



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**Πειραματική μελέτη επίδρασης προϋπάρχουσας παραμόρφωσης στη  
συμπεριφορά εξέλιξης ρωγμής του χάλυβα TRIP 700**

ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΑ ΠΑΠΑΪΩΑΝΝΟΥ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των  
απαιτήσεων για την απόκτηση του  
Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού 2018

Copyright ©2018 Παπαϊωάννου Κρυσταλλία  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

**Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:**

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων) Δρ. Αλέξης Κερμανίδης  
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Μιχάλης Αγόρας  
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Άννα Ζερβάκη  
Καθηγήτρια, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο  
Θεσσαλίας

## Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Λέκτορα κ. Αλέξη Κερμανίδη, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου.

Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητές κκ. Μιχάλη Αγόρα και Άννα Ζερβάκη για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

Ακόμα, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στη Γιαννα και τον Γρηγόρη για την καθοδήγηση που μου προσέφεραν κατά την πρώτη μου επαφή με τον εργαστηριακό εξοπλισμό καθώς και στον Πέτρο Χριστοδούλου για την πολύτιμη βοήθεια του σε προβλήματα που προέκυψαν στο εργαστήριο κατά την περίοδο που ήταν παρών.

Τέλος, θα ήμουν αγνώμων αν δεν ευχαριστούσα τους γονείς μου, Γιώργο και Κυριακή, και τα αδέρφια μου, Μαρίνα και Νίκο, που στάθηκαν δίπλα μου όλα τα χρόνια των σπουδών μου και με υποστήριξαν απόλυτα σε όλα τα βήματά και τις αποφάσεις μου.

Κρυσταλλία Παπαϊωάννου

## Περίληψη

Στον κλάδο της αυτοκινητοβιομηχανίας πραγματοποιείται συνεχώς εκτεταμένη έρευνα για την επιλογή κατάλληλων υλικών προκειμένου να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή απόδοση των οχημάτων σε συνδυασμό με την πιο οικονομική και φιλική προς το περιβάλλον λύση. Οι πολυφασικοί χάλυβες χαμηλής κραμάτωσης κατηγορίας TRIP (TRAnsformation Induced Plasticity) αποτελούν υλικά που χρησιμοποιούνται εκτεταμένα τα τελευταία χρόνια καθώς πληρούν σε μεγάλο βαθμό τις προδιαγραφές που έχουν τεθεί. Συγκεκριμένα, συνδυάζουν τόσο αυξημένες τιμές αντοχής σε θραύση όσο και ολκιμότητα, συνδυασμός ο οποίος βοηθά στη μείωση του βάρους του οχήματος και στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμων, αυξάνοντας ταυτόχρονα την παθητική ασφάλεια των επιβατών.

Οι εξαιρετικές ιδιότητες των χαλύβων TRIP οφείλονται στη σύνθετη μικροδομή τους η οποία αποτελείται από διάφορες φάσεις όπως φερρίτη, μπαινίτη, μετασταθή ωστενίτη και μικρά ποσοστά μαρτενσίτη. Από τις φάσεις αυτές ιδιαίτερα σημαντική είναι η φάση του ωστενίτη η οποία εξαιτίας του ότι βρίσκεται σε μετασταθή κατάσταση, όταν δεχθεί εξωτερική παραμόρφωση μετασχηματίζεται στην πιο σταθερή μαρτενσιτική φάση με ταυτόχρονη αύξηση της τελικής αντοχής σε θραύση του χάλυβα.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η πειραματική μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς χάλυβα TRIP 700 που έχει υποστεί προένταση σε διαφορετικά ποσοστά πλαστικής παραμόρφωσης. Στόχος είναι να διερευνηθεί η επίδραση του ποσοστού μαρτενσίτη της μικροδομής του χάλυβα TRIP που έχει προκύψει από μετασχηματισμό, στη συμπεριφορά θραύσης του υλικού. Για τον σκοπό αυτό πραγματοποιούνται πειράματα προέντασης σε διαφορετικά ποσοστά πλαστικής παραμόρφωσης χάλυβα TRIP και αποτιμώνται οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού με αρχική πλαστική παραμόρφωση. Στη συνέχεια γίνονται πειράματα θραύσης σε μονοτονική καταπόνηση για τον προσδιορισμό της καμπύλης R (R-curve) που χαρακτηρίζει την αντίσταση σε θραύση των υλικών.

Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων προκύπτει ότι η προϋπάρχουσα παραμόρφωση, που έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή του αρχικού ποσοστού μαρτενσίτη στη μικροδομή, επιδρά σημαντικά στη συμπεριφορά θραύσης του υλικού. Το γενικό συμπέρασμα είναι ότι με την αύξηση του ποσοστού πλαστικής παραμόρφωσης και επομένως του ποσοστού μαρτενσίτη το υλικό τείνει να παρουσιάζει μια πιο ψαθυρή υπό την επίδραση εφελκυστικών φορτίων ενώ η αντίσταση του σε θραύση μειώνεται στην περίπτωση εμφάνισης ρωγμής στη δομή του.

# Πίνακας Περιεχομένων

<b>Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1 Γενικά	1
1.2 Χάλυβες TRIP στην αυτοκινητοβιομηχανία	2
1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας	4
<b>Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση</b>	<b>5</b>
2.1 Στοιχεία από τη Μηχανική των Θραύσεων	5
2.2 Χαρακτηριστικά των ρωγμών	5
2.3 Επίπωση ένταση και επίπεδη παραμόρφωση	9
2.4 Όρια της γραμμικής ελαστικής θεωρίας-Συνθήκη μικρής πλαστικότητας	11
2.5 Καμπύλες αντίστασης στη θραύση	12
<b>Κεφάλαιο 3 Χάλυβας TRIP</b>	<b>16</b>
3.1 Γενικά	16
3.2 Διαδικασία παραγωγής	17
3.3 Μηχανικές ιδιότητες	19
3.3.1 Παραμορφωσιμότητα χαλύβων TRIP	20
3.4 Χαρακτηριστικά του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού	21
3.5 Πλαστικότητα μετασχηματισμού	22
3.6 Διάδοση ρωγμών στο χάλυβα TRIP	24
3.9 Επίδραση της προέντασης στο ποσοστό παραμένουτος ωστενίτη χάλυβα TRIP	26
<b>Κεφάλαιο 4 Πειραματική διαδικασία</b>	<b>29</b>
4.1 Στόχοι	29
4.2 Πειραματική διάταξη	30
4.2.1 Μηχανές εφελκυσμού	30
4.2.2 Οπτικό σύστημα καταγραφής παραμορφώσεων της Limes-RTSS Videoextensometer	31
4.3 Υλικό δοκιμών	33
4.4 Δοκιμές μονοαξονικού εφελκυσμού	34

4.4.1	Πρώτη σειρά πειραμάτων .....	36
4.4.2	Δεύτερη σειρά πειραμάτων .....	37
4.5	Δοκιμές προσδιορισμού της αντίστασης σε θραύση .....	38
4.5.1	Πειραματικές συνθήκες.....	38
<b>Κεφάλαιο 5 Αποτελέσματα .....</b>		<b>44</b>
5.1	Αποτελέσματα πειραμάτων μονοαξονικού εφελκυσμού .....	44
5.1.1	Σύγκριση καμπυλών εφελκυσμού για τα διάφορα εύρη προέντασης.....	44
5.1.2	Σύγκριση καμπυλών εφελκυσμού από δύο διαφορετικά συστήματα καταγραφής .....	48
5.2	Αποτελέσματα πειραμάτων αντίστασης σε θραύση.....	51
<b>Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα-Προτάσεις.....</b>		<b>54</b>
6.1	Συμπεράσματα .....	54
6.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....	55
<b>Βιβλιογραφία .....</b>		<b>56</b>

## Κατάλογος Πινάκων

<b>Πίνακας 3-1:</b> Κύρια κραματικά στοιχεία ενός τυπικού χάλυβα TRIP. ....	17
<b>Πίνακας 3-2:</b> Μετρήσεις του παραμένουτος ωστενίτη για κάθε εύρος ποσοστού προέντασης....	27
<b>Πίνακας 3-3:</b> Μετρήσεις του μέσου μεγέθους των κόκκων για κάθε εύρος ποσοστού προέντασης .....	28
<b>Πίνακας 4-1:</b> Κύρια κραματικά στοιχεία χάλυβα TRIP 700 (κατά βάρος %). ....	32
<b>Πίνακας 4-2:</b> Τιμές σταθερών C <sub>i</sub> για μετρήσεις στο άκρο της εγκοπής. ....	44
<b>Πίνακας 3-2:</b> Μετρήσεις του παραμένουτος ωστενίτη για κάθε εύρος ποσοστού προέντασης....	34
<b>Πίνακας 3-3:</b> Μετρήσεις του μέσου μεγέθους των κόκκων για κάθε εύρος ποσοστού προέντασης .....	35
<b>Πίνακας 4-1:</b> Κύρια κραματικά στοιχεία χάλυβα TRIP 700 (κατά βάρος %). ....	39
<b>Πίνακας 4-2:</b> Ιδιότητες εφελκυσμού του χάλυβα TRIP 700... ..	40
<b>Πίνακας 5-1:</b> Ιδιότητες εφελκυσμού του χάλυβα TRIP 700 για διαφορετικά ποσοστά προέντασης. .....	45
<b>Πίνακας 5-2:</b> Χαρακτηριστικές τιμές πειραμάτων αντίστασης σε θραύση του χάλυβα TRIP 700 για διαφορετικά ποσοστά προέντασης.....	51



## Κατάλογος Σχημάτων

<b>Σχήμα 1-1:</b> Σχηματική αναπαράσταση αντοχής και παραμορφωσιμότητας χαλύβων αυτοκινητοβιομηχανίας. ....	2
<b>Σχήμα 2-1:</b> Ελαστικές τάσεις κοντά στην αιχμή της ρωγμής.....	6
<b>Σχήμα 2-2:</b> Επίδραση του πάχους στην κρίσιμη τιμή του συντελεστή έντασης τάσεων. ....	10
<b>Σχήμα 2-3:</b> Καμπύλη δυσθραυστότητας ενός ψαθυρού υλικού.....	13
<b>Σχήμα 2-4:</b> Καμπύλη δυσθραυστότητας ενός όλκιμου υλικού. ....	14
<b>Σχήμα 2-5:</b> Καμπύλη δυσθραυστότητας ενός όλκιμου υλικού και μέθοδος υπολογισμού της τιμής $K_{IC}$ .....	15
<b>Σχήμα 3-1:</b> Θερμική κατεργασία για την παραγωγή χάλυβα TRIP. ....	17
<b>Σχήμα 3-2:</b> Σύγκριση των διαγραμμάτων σ-ε για διαφορετικά ήδη χαλύβων .....	20
<b>Σχήμα 3-3:</b> Καμπύλες ελεύθερης ενέργειας-θερμοκρασίας για μητρική και ωστενιτική φάση....	21
<b>Σχήμα 3-4:</b> Σχηματική παράσταση μαρτενσιτικού μετασχηματισμού υπό την επιρροή εξωτερικών τάσεων .....	23
<b>Σχήμα 3-5:</b> Ποσοστό (α) του παραμένουστος ωστενίτη (F <sub>y</sub> ) και του ποσοστού μαρτενσίτη (FM) και (b) της περιεκτικότητας σε άνθρακα της ωστενιτικής φάσης σε σχέση με το ποσοστό προέντασης .....	26
<b>Σχήμα 5-1:</b> Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης χάλυβα TRIP 700 για διάφορα ποσοστά προέντασης .....	44
<b>Σχήμα 5-2:</b> Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης χάλυβα TRIP 700 για κάθε ένα από τα ποσοστά προέντασης. ....	45

<b>Σχήμα 5-3:</b> Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης χάλυβα TRIP 700 για ποσοστό προέντασης 4% με καταγραφή δεδομένων μέσω επιμηκυνσιόμετρου και οπτικού συστήματος.....	48
<b>Σχήμα 5-4:</b> Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης χάλυβα TRIP 700 για ποσοστό προέντασης 8% με καταγραφή δεδομένων μέσω επιμηκυνσιόμετρου και οπτικού συστήματος.....	49
<b>Σχήμα 5-5:</b> Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης χάλυβα TRIP 700 για ποσοστό προέντασης 12% με καταγραφή δεδομένων μέσω επιμηκυνσιόμετρου και οπτικού συστήματος.....	49
<b>Σχήμα 5-6:</b> Καμπύλη δυσθραυστότητας χάλυβα TRIP 700 για διάφορα ποσοστά προέντασης).	51

## Κατάλογος Εικόνων

<b>Εικόνα 2-1:</b> Τρεις βασικοί τύποι φόρτισης ρωγμής. ....	7
<b>Εικόνα 2-2:</b> Δοκίμιο με πλευρική ρωγμή και στοιχειώδεις διαστάσεις. ....	8
<b>Εικόνα 2-3:</b> Περιοχές επίπεδης έντασης και επίπεδης παραμόρφωσης στην αιχμή ενός ρήγματος. .....	9
<b>Εικόνα 2-4:</b> Πλαστική ζώνης ρωγμής και μέγεθος πεδίου K. ....	11
<b>Εικόνα 3-1:</b> Σημεία του αμαξώματος όπου χρησιμοποιείται χάλυβας TRIP. ....	16
<b>Εικόνα 3-2:</b> Αντιστοιχία πλεγμάτων για τον μετασχηματισμό FCC σε BCT στους χάλυβες. ....	22
<b>Εικόνα 3-3:</b> Εικόνες SEM διάδοσης ρωγμής σε χάλυβα TRIP και μεγέθυνση περιοχής A.....	25
<b>Εικόνα 3-4:</b> Χάρτης φάσεων στην άκρη ρήγματος υπολογισμένων από OIM σε χάλυβα TRIP 0.45C.....	25
<b>Εικόνα 4-1:</b> Διάταξη της μηχανής εφελκυσμού Instron του Εργαστηρίου Μηχανικής και Αντοχής των Υλικών.....	30
<b>Εικόνα 4-2:</b> Διάταξη της μηχανής εφελκυσμού MTS του Εργαστηρίου Μηχανικής και Αντοχής των Υλικών.....	31
<b>Εικόνα 4-3:</b> Απόσταση μεταξύ δύο σημείων όπως αναγνωρίζονται μέσω του λογισμικού του οπτικού συστήματος.....	31
<b>Εικόνα 4-4:</b> Μικροδομή χάλυβα TRIP 700 Hot Rolled (x1000).....	32
<b>Εικόνα 4-5:</b> Διάταξη πρώτης σειράς πειραμάτων με τη χρήση του οπτικού συστήματος παραμορφώσεων.....	34
<b>Εικόνα 4-6:</b> Διάταξη δεύτερης σειράς πειραμάτων (μονοαξονικού εφελκυσμού).....	35

<b>Εικόνα 4-7:</b> Πλάκα του χάλυβα TRIP και τοποθέτηση (α) των δοκιμών C(T) και (β) των δοκιμών εφελκυσμού σε σχέση με αυτή .....	36
<b>Εικόνα 4-8:</b> Διαστάσεις δοκιμών εφελκυσμού.....	37
<b>Εικόνα 4-9:</b> Σχέδιο του δοκιμίου C(T) με τις βασικές τους διαστάσεις.....	39
<b>Εικόνα 4-10:</b> Γεωμετρία στην άκρη της εγκοπής.....	39
<b>Εικόνα 4-11:</b> Φωτογραφία της αρχικής ρηγμάτωσης μέσω του οπτικού συστήματος καταγραφής. .....	40
<b>Εικόνα 4-12:</b> Σημεία V1 και V2 για μέτρηση της εξέλιξης ρωγμής .....	41
<b>Εικόνα 4-13:</b> Πειραματική διάταξη οπτικού συστήματος κατά τα πειράματα δυσθραυστότητας	41
<b>Εικόνα 4-14:</b> Πειραματική διάταξη δοκιμίου κατά τα πειράματα δυσθραυστότητας.....	42
<b>Εικόνα 4-15:</b> Άνοιγμα των χειλέων της ρωγμής σε μεγέθυνση .....	43
<b>Εικόνα 5-1:</b> Δοκίμιο εφελκυσμού που έχει προετοιμαστεί για δύο διαφορετικούς τρόπους καταγραφής.....	50

## Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

### 1.1 Γενικά

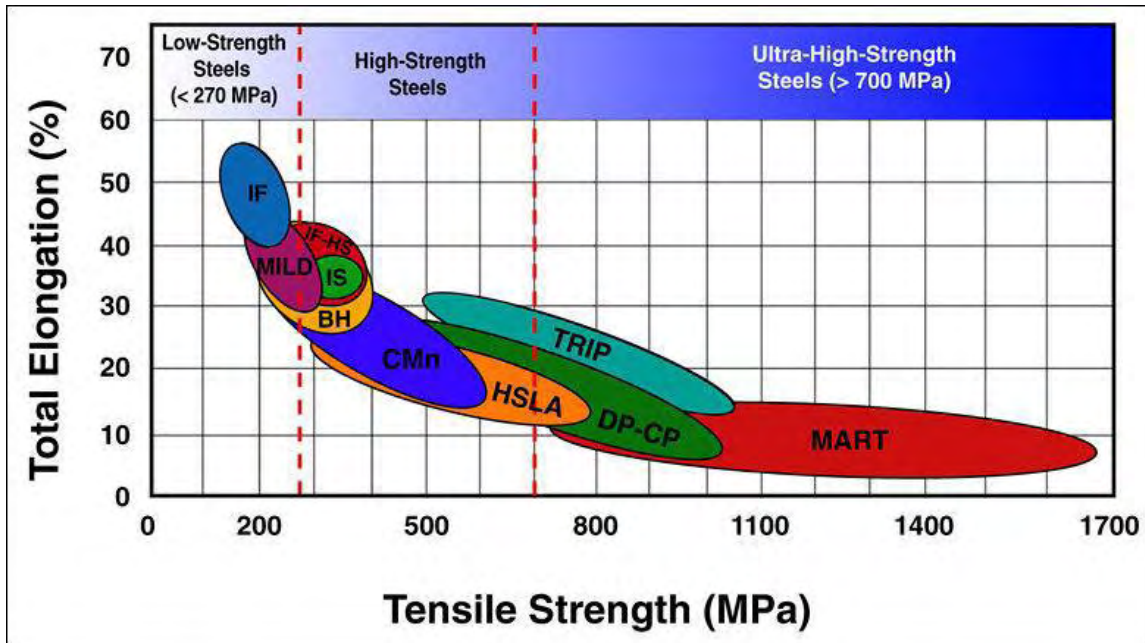
Η αυτοκινητοβιομηχανία είναι μία από τις πιο προσοδοφόρες αγορές παγκοσμίως, και ως τέτοια στοχεύει στη συνεχή βελτίωση των προϊόντων της έχοντας ως βασικούς στόχους της την αύξηση της αποδοτικότητας και της λειτουργικότητας χωρίς ωστόσο να πλήττεται η ασφάλεια του χρήστη. Στον τομέα των υλικών, παραδοσιακά ένα από τα κυριότερα υλικά που χρησιμοποιείται στην κατασκευή των αυτοκινήτων είναι ο **χάλυβας**. Ο χάλυβας καθίσταται εξαιρετική πρώτη ύλη λόγω της αυξημένης του αντοχής, της μικρής κατανάλωσης ενέργειας που απαιτείται κατά την παραγωγή του καθώς και της ανακυκλωσιμότητάς του.

Ωστόσο, η κρίση του πετρελαίου σε συνδυασμό με την τρέχουσα τάση για παραγωγή οχημάτων φιλικών προς το περιβάλλον οδήγησε την αυτοκινητοβιομηχανία στην αναζήτηση νέων τρόπων παραγωγής ελαφρύτερων οχημάτων, ώστε να μειωθεί η κατανάλωση καυσίμου, και κατ' επέκταση στην αναζήτηση νέων υλικών για την επίτευξη αυτού του στόχου. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα η χρήση ελαφρών υλικών στα τέλη της δεκαετίας του 1990 όπως αλουμινίου, μαγνησίου, πολυμερών και ινών άνθρακα να αντικαταστήσει το χάλυβα σε πολλές εφαρμογές. Αυτή η κατάσταση ανάγκασε τις βιομηχανίες χάλυβα να δημιουργήσουν **προηγμένα κράματα** με αυξημένη αντοχή σε θραύση, ολκιμότητα και διαμορφωσιμότητα σε σχέση με τους έως τότε χρησιμοποιούμενους τύπους χάλυβα προκειμένου να ανακτήσουν το μερίδιο της αγοράς το οποίο επί δεκαετίες τους ανήκε. Τα χαλύβδινα αυτά κράματα, τα οποία από τότε έχουν διαδραματίσει ένα πολύ σημαντικό ρόλο όχι μόνο στην αυτοκινητοβιομηχανία αλλά και σε άλλους βιομηχανικούς κλάδους, ονομάστηκαν **Χάλυβες Υψηλής Αντοχής (HSS)**.

Εισάγοντας τη νέα αυτή κατηγορία χαλύβων επιτεύχθηκε μείωση του συνολικού βάρους των χαλύβδινων στοιχείων του οχήματος χωρίς να επηρεάζεται ωστόσο η εμφάνιση του. Επιπλέον, η βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων, η καλύτερη διαμορφωσιμότητα, η μεγάλη ενεργειακή απορρόφηση και η αντοχή στη διάβρωση είναι χαρακτηριστικά που ενίσχυσαν την υπεροχή της κατηγορίας αυτής σε σχέση με τους συμβατικούς χάλυβες της αγοράς. Ακόμα, το γεγονός ότι η διαδικασία παραγωγής τους είναι παρόμοια με αυτή των κοινών χαλύβων χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, τους καθιστά υλικό πολύ ελκυστικό, αφού με τη χρήση τους μειώνεται το τελικό κόστος παραγωγής ενώ παράλληλα αυξάνεται η παραγωγικότητα λόγω της χρήσης λιγότερου υλικού στο τελικό προϊόν.

Η δεδομένη χρήση τους γίνεται αμέσως εμφανής αν αναλογιστεί κανείς ότι το 55% της συνολικής μάζας του αυτοκινήτου αποτελείται από χάλυβες και από το ποσοστό αυτό το 50% των χαλύβων που χρησιμοποιούνται σήμερα ανήκουν στην κατηγορία χαλύβων πολύ

υψηλής αντοχής σε θραύση (HSS). Από αυτή την κατηγορία χαλύβων ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι **χάλυβες TRIP (Transformation Induced Plasticity)**, που αποτελούν και το αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 1-1: Σχηματική αναπαράσταση αντοχής και παραμορφωσιμότητας χαλύβων αυτοκινητοβιομηχανίας

## 1.2 Χάλυβες TRIP στην αυτοκινητοβιομηχανία

Οι χάλυβες TRIP, ως μία από τις κατηγορίες των χαλύβων υψηλής αντοχής, έχουν σημαντική παρουσία στην αυτοκινητοβιομηχανία, γεγονός το οποίο οφείλεται στο συνδυασμό υψηλής αντοχής και παραμορφωσιμότητας που προσφέρουν, στην υψηλή απορρόφηση ενέργειας που επιτυγχάνουν σε περίπτωση κρούσης, καθιστώντας τα υλικά ιδανικά για την κατασκευή οχημάτων που δίνουν μεγαλύτερη έμφαση στην ασφάλεια των επιβατών, καθώς και στην επίτευξη χαμηλού κόστους χωρίς να θυσιάζεται η επίδοσή τους.

Οι χάλυβες TRIP χρησιμοποιούνται κυρίως στις μπάρες προστασίας του αυτοκινήτου, στις κολώνες και γενικά σε όποιο σημείο απαιτείται αυξημένη παθητική ασφάλεια στο αμάξωμα. Ωστόσο, η χρήση τους θεωρείται ότι μπορεί στο άμεσο μέλλον να επεκταθεί και σε εξαρτήματα του κάτω μέρους του αυτοκινήτου, όπως ζάντες τροχών, αναρτήσεις και μεντεσέδες από πόρτες, όπου σήμερα χρησιμοποιούνται φερριτικοί - μαρτενσιτικοί χάλυβες, ενώ οι κατασκευαστές υποστηρίζουν ότι στο μέλλον μπορεί να αποτελέσουν την επόμενη γενιά κατασκευαστικών χαλύβων στη σφυρηλάτηση μηχανικών τμημάτων διάφορων μηχανών. Ωστόσο, αν οι χάλυβες TRIP πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε δοχεία υψηλής πίεσης και σε μηχανήματα κατασκευής με απαιτήσεις ακόμα υψηλότερης αντοχής

τότε θα πρέπει αυτομάτως να αυξηθούν και οι απαιτήσεις όσο αναφορά την αντοχή θραύσης των κατασκευών και τη δυσθραυστότητά τους.

Παράλληλα, στα πλαίσια οποιασδήποτε κατασκευής λόγω της πολυπλοκότητας τους τα δομικά στοιχεία απαιτείται να έχουν συγκεκριμένες διαμορφώσεις, οπές και εγκοπές έτσι ώστε να εξυπηρετούν το σκοπό τους. Οι διαμορφώσεις αυτές είναι σημεία τοπικής ασυνέχειας του υλικού και ως τέτοια εισάγουν πεδία συγκέντρωσης τάσεων στα στοιχεία. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τις δυναμικές φορτίσεις που λαμβάνουν χώρα, οδηγεί στη συσσώρευση της βλάβης, η οποία εμφανίζεται με τη μορφή μικροσκοπικών ατελειών και τελικά μακροσκοπικών ρωγμών. Επομένως, η μελέτη της συμπεριφοράς θραύσης του υλικού σε περίπτωση εμφάνισης ρωγμής κρίνεται ακόμα πιο επιτακτική προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι η εξέλιξη κάθε μορφής ατέλειας μπορεί να προβλεφθεί και να ελεγχθεί.

Τέλος, η διαμόρφωση των υλικών σε συγκεκριμένες γεωμετρίες, όπως αυτές έχουν οριστεί από το σχεδιασμό, μέσω κατάλληλων κατεργασιών μορφοποίησης, έχει ως αποτέλεσμα την επιβολή μόνιμων παραμορφώσεων στο υλικό οι οποίες οδηγούν σε αλλαγή της συμπεριφοράς του τόσο σε στατικά όσο και σε μεταβαλλόμενα φορτία. Καθώς οι προσομοιώσεις αντοχής που γίνονται στην αυτοκινητοβιομηχανία γίνονται τυπικά αντλώντας δεδομένα από υλικό χωρίς παραμόρφωση, οι όποιες αλλαγές στις ιδιότητες του υλικού προκύπτουν κατά τις κατεργασίες διαμορφώσεων δεν λαμβάνονται υπόψη και μπορεί να έχουν σημαντικό αντίκτυπο στα αποτελέσματα που προκύπτουν. Επομένως, προκειμένου να αποφευχθεί η εισαγωγή σφαλμάτων στα αποτελέσματα, είναι σημαντικό να υπολογιστούν οι ιδιότητες των υλικών με ή χωρίς ατέλεια στη δομή τους μετά την επιβολή προέντασης, ανάγκη η οποία ενισχύεται από το γεγονός ότι η μικροδομή του χάλυβα TRIP μεταβάλλεται όταν επιβληθούν σε αυτόν μηχανικές τάσεις.

### 1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Η συνέχεια της εργασίας ακολουθεί την εξής δομή:

- **Κεφάλαιο 2:** Βιβλιογραφική ανασκόπηση των χαρακτηριστικών ενός ρήγματος και της συμπεριφοράς θραύσης του υλικού. Αναλύεται η συμπεριφορά ενός υλικού κάτω από εφελκυστικά φορτία καθώς και ο μηχανισμός διάδοσης ρωγμής που λαμβάνει χώρα όταν υπάρχει ήδη ατέλεια στο υλικό. Ακόμα παρουσιάζονται οι έννοιες και οι τύποι που θα χρησιμοποιηθούν αργότερα στην εργασία.
- **Κεφάλαιο 3:** Το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται στα χαρακτηριστικά των χαλύβων TRIP, στις ιδιότητες και στη χρήση τους σε διάφορες εφαρμογές. Ακόμα, γίνεται ανάλυση του φαινομένου TRIP, των μεθόδων παραγωγής του κραματωμένου αυτού χάλυβα και του μηχανισμού του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού που λαμβάνει χώρα. Τέλος, αναφέρονται κάποια στοιχεία από τη βιβλιογραφία σχετικά με τη συμπεριφορά θραύσης του υλικού και τις ιδιότητες του με την παρουσία προέντασης.
- **Κεφάλαιο 4:** Περιγράφεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε. Συγκεκριμένα, γίνεται περιγραφή του πειραματικού υλικού, του εξοπλισμού και των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της εργασίας.
- **Κεφάλαιο 5:** Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων που έλαβαν χώρα κατά την εκπόνηση της εργασίας με μορφή πινάκων και διαγραμμάτων και στη συνέχεια αναλύονται. Τα πειράματα που έλαβαν χώρα ήταν πειράματα φόρτισης-αποφόρτισης, πειράματα μονοαξονικού εφελκυσμού καθώς και πειράματα εξέλιξης ρωγμής κατά την επιβολή εφελκυστικών φορτίων για διάφορα ποσοστά αρχικής προέντασης.
- **Κεφάλαιο 6:** Αναφέρονται τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα των πειραμάτων. Ακόμα, γίνονται κάποιες προτάσεις για μελλοντική επέκταση των ευρημάτων αυτών.



## Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική ανασκόπηση

### 2.1 Στοιχεία από τη Μηχανική των Θραύσεων

Η διάρκεια ζωής ενός φορέα ή μιας κατασκευής μπορεί να υποβαθμιστεί με την εμφάνιση κάποιας ατέλειας που είναι ικανή να οδηγήσει στη δημιουργία ρωγμής. Τα ρήγματα με τη μορφή μικρορωγμών μπορεί είτε να προϋπάρχουν ως ατέλειες μέσα σε ένα υλικό είτε να δημιουργούνται σταδιακά λόγω κόπωσης του υλικού, διάβρωσης, ακτινοβολίας, κλπ. Επομένως, για την επίτευξη ενός ολοκληρωμένου σχεδιασμού ενός στοιχείου, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη μελέτες που να σχετίζονται τόσο με την πιθανότητα εμφάνισης ρωγμών όσο και με την μείωση της διάρκειας ζωής που αυτές επιφέρουν.

Η **μηχανική των θραύσεων** είναι η επιστήμη που μελετά τη συμπεριφορά αντοχή ενός στοιχείου όταν υπάρχει σε αυτό μία ρωγμή.

### 2.2 Χαρακτηριστικά των ρωγμών

Η ύπαρξη μιας ρωγμής έχει πολύ μεγάλη επίδραση στη μηχανική συμπεριφορά ενός μηχανολογικού στοιχείου καθώς προκαλεί μία τοπική συγκέντρωση τάσεων, γεγονός που σημαίνει ότι οι τάσεις που επικρατούν στην περιοχή γύρω από το ρήγμα είναι πολύ υψηλότερες από αυτές που επικρατούν στο υπόλοιπο υλικό, υποβαθμίζοντας έτσι τη συμπεριφορά του υλικού τόσο σε στατική φόρτιση όσο και σε κόπωση, μειώνοντας σημαντικά τη διάρκεια ζωής του. Η επίδραση αυτή μπορεί να γίνει ορατή στις καμπύλες αντίστασης του υλικού ( $\sigma$  curves) όταν μελετάται η αντοχή του σε στατικά φορτία καθώς και στα διαγράμματα  $\sigma$ - $N$  όταν μελετάται η αντοχή του σε κόπωση.

Επιπλέον, οι ρωγμές είναι δαπανηρές στην επισκευή ενώ σε πολλές περιπτώσεις η πλήρης αποκατάσταση του στοιχείου δεν είναι δυνατή. Σε πολλές μάλιστα περιπτώσεις μπορεί να προκαλέσουν θραύση της κατασκευής και να θέσουν σε κίνδυνο τόσο το περιβάλλον όσο και την ανθρώπινη ζωή. Λαμβάνοντας αυτά υπόψη γίνεται αμέσως εμφανής η επιτακτική ανάγκη για μελέτη της επίδρασης των ρωγμών πάνω σε ένα μηχανολογικό στοιχείο καθώς και για εύρεση μεθόδων που μειώνουν τις αρνητικές επιπτώσεις που προκαλούνται.

Οι ποσοτικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται σήμερα για τη θραύση των ρηγματωμένων στερεών διατυπώθηκαν αρχικά από τον **A. A. Griffith** πριν 80 περίπου χρόνια, ο οποίος χάρη στη δουλειά του και τις πρωτοποριακές του θεωρίες σήμερα θεωρείται ο πατέρας της θραυστομηχανικής.

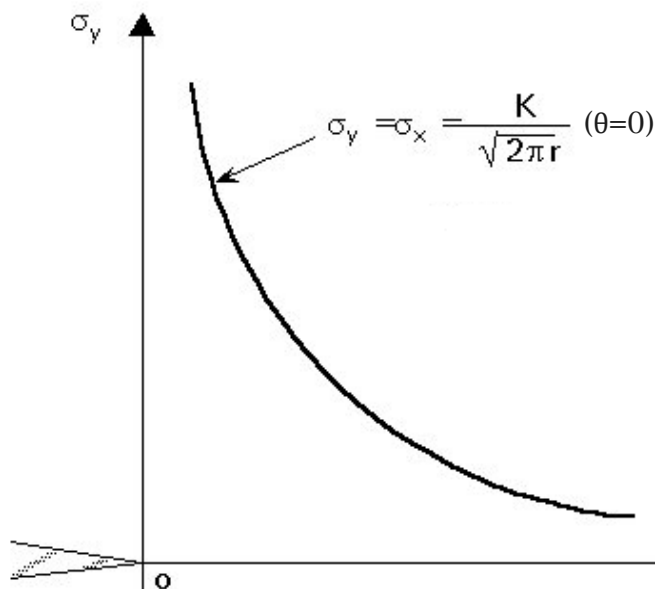
Σύμφωνα με τον Griffith, οι μικρορωγμές και οι ατέλειες που υπάρχουν στο υλικό αυξάνουν σε διαστάσεις, ενώνονται και διαδίδονται, όταν επιβληθεί στο υλικό ένα εξωτερικό φορτίο. Πιο συγκεκριμένα, ένα προϋπάρχον ρήγμα τείνει να διαδοθεί όταν

πρόκειται με αυτό τον τρόπο να μειωθεί η συνολική ενέργεια του συστήματος, καθώς η μείωση της ελαστικής παραμορφωτικής ενέργειας εντός ενός φορτισμένου σώματος βρίσκεται σε ισορροπία με την ενέργεια που απαιτείται για την καταπολέμηση των δυνάμεων συνοχής και την δημιουργία νέων επιφανειών της ρωγμής. [1]

Αργότερα ο Irwin εξέλιξε την θεωρία του Griffith εφαρμόζοντάς την σε μέταλλα με μικρή πλαστικότητα και ανέπτυξε την μέθοδο της έντασης τάσεων. Χρησιμοποιώντας την ενεργειακή προσέγγιση του Griffith, απέδειξε ότι οι τάσεις στην περιοχή της ρωγμής έχουν την μορφή:

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cdot f(\theta) \quad (2.1)$$

όπου  $r, \theta$  είναι οι κυλινδρικές συντεταγμένες του σημείου που μελετάται ως προς της ρωγμής και  $K$  είναι μια αδιάστατη παράμετρος που εξαρτάται από την γεωμετρία του δοκιμίου και το πλάτος της ρωγμής και ονομάζεται **συντελεστής έντασης τάσεων**.

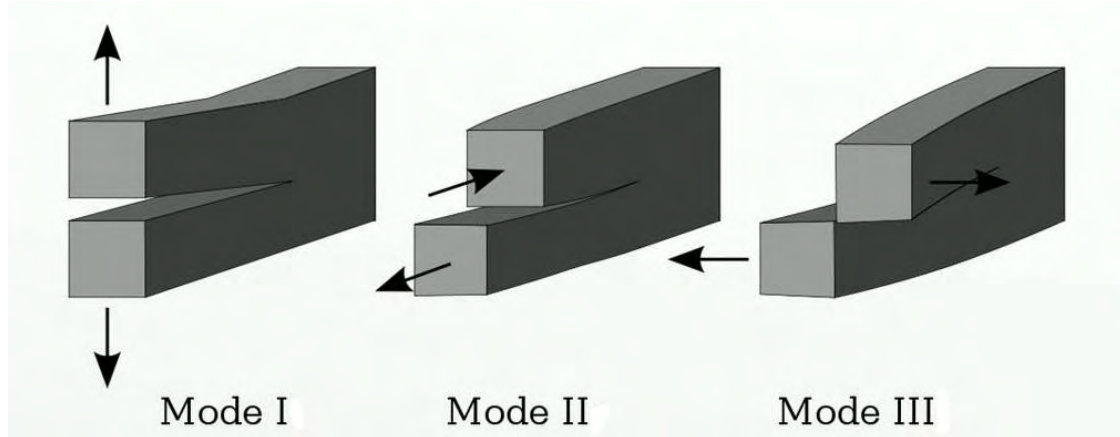


**Σχήμα 2-1: Ελαστικές τάσεις κοντά στην αιχμή της ρωγμής**

Ο συντελεστής  $K$  είναι απαραίτητος, για να υπολογιστεί είτε η στατική αντοχή μιας κατασκευής με ρωγμή είτε η επέκταση μιας ρωγμής σε κατασκευή που φορτίζεται δυναμικά είτε η επέκταση μιας ρωγμής λόγω διάβρωσης σε μια φορτισμένη κατασκευή. Η τιμή του είναι κοινή για το ίδιο υλικό για διάφορες συνθήκες φόρτισης και διαφορετικές γεωμετρίες των στοιχείων. Ωστόσο για να μπορέσει να προβλεφθεί σωστά η συμπεριφορά

των ατελειών θα πρέπει να υπολογιστεί ο κατάλληλος συντελεστή  $K$  ανάλογα με τον τύπο φόρτισης που εφαρμόζεται. [2]

Διακρίνονται τρεις διαφορετικοί συντελεστές  $K$  που ο καθένας αντιστοιχεί και σε ένα τύπο φόρτισης της ρωγμής (loading mode):



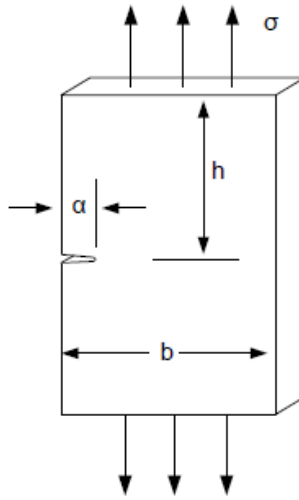
*Εικόνα 2-1: Τρεις βασικοί τύποι φόρτισης ρωγμής*

- $K_I$ : εφαρμόζεται κατά τον τύπο φόρτισης I (opening mode). Προκύπτει κατά τον εφελκυσμό του δοκιμίου, όπου η φόρτιση είναι κάθετη στον άξονα της ρωγμής και προκαλεί άνοιγμα του ρήγματος. Οι επιφάνειες της ρωγμής μετατοπίζονται κάθετα προς το επίπεδο της ρωγμής λόγω των εφελκυστικών καταπονήσεων.
- $K_{II}$ : εφαρμόζεται κατά τον τύπο φόρτισης II (sliding mode). Οι επιφάνειες της ρωγμής ολισθαίνουν η μία πάνω στην άλλη εξαιτίας διατμητικών δυνάμεων που δρουν σε αντίθετη διεύθυνση και βρίσκονται στο επίπεδο κάθετα προς το ίχνος της ρωγμής. Συναντάται πολύ σπάνια, συνήθως σε συνδυασμό με ένα από τους δύο άλλους τύπους.
- $K_{III}$ : εφαρμόζεται κατά τον τύπο φόρτισης III (tearing mode). Οι επιφάνειες της ρωγμής ολισθαίνουν η μία πάνω στην άλλη εξαιτίας διατμητικών δυνάμεων που δρουν σε αντίθετη διεύθυνση και βρίσκονται στο επίπεδο παράλληλα προς την ακμή της ρωγμής. Εμφανίζεται κυρίως κατά της στρέψη μιας ράβδου που περιέχει ρωγμή.

Ο τύπος φόρτισης I, καθώς προκύπτει από εφελκυστικά φορτία, αποτελεί και τον πιο συνηθισμένο τύπο φόρτισης ρωγμής και για αυτό το λόγο έχει λάβει μεγαλύτερη προσοχή τόσο σε θεωρητικό όσο και πειραματικό επίπεδο. Η τιμή του συντελεστή έντασης τάσεων για αυτό τον τύπο φόρτισης και για δοκίμιο με πλευρική ρωγμή, η οποία είναι και η περίπτωση που απασχολεί την παρούσα εργασία, προκύπτει από την εξής σχέση:

$$K_I = 1.12 \cdot \sigma \sqrt{\pi a}, \text{ αν } a/b \leq 0.13 \quad (2.6)$$

όπου  $a$  είναι το μήκος της ρωγμής και  $b$  είναι το συνολικό μήκος του δοκιμίου όπως φαίνεται και στην εικόνα 2-2.



*Εικόνα 2-2: Δοκίμιο με πλευρική ρωγμή και στοιχειώδεις διαστάσεις*

Όταν η συνθήκη  $a/b$  πάψει να είναι αληθής, για να γίνει σωστή εκτίμηση του  $K_I$  θα πρέπει η τιμή του να υπολογιστεί ως γινόμενο της παραπάνω σχέσης με ένα διορθωτικό συντελεστή  $F$ . Ο συντελεστής  $F$  έχει υπολογιστεί για πολλές διαφορετικές γεωμετρίες δοκιμίων με προϋπάρχουσες ρωγμές, οπότε η επιλογή του εξαρτάται από την περίπτωση που μελετάται. [2, 3]

Ακόμα ο Irwin απέδειξε ότι η διάδοση της ρωγμής εξαρτάται από την επίτευξη μιας κρίσιμης τιμής για τον Συντελεστή Έντασης Τάσεων η οποία αποκαλείται **Αντοχή Θραύσης  $K_C$** . Η κρίσιμη αυτή τιμή συνδέεται με την επίτευξη της κρίσιμης ελαστικής ενέργειας  $G_C$  μέσω της σχέσης:

$$G_C = \frac{K_C^2}{E} \quad (2.2)$$

Μέσω αυτού του συντελεστή καθορίζεται και η **συνθήκη θραύσης του υλικού** η οποία είναι η εξής:

$$K_C \geq K_I \quad (2.3)$$

$$\text{όπου} \quad K_I = Y \cdot \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2.4)$$

$$\text{και} \quad K_C = Y \cdot \sigma_c \sqrt{\pi a} \quad (2.5)$$

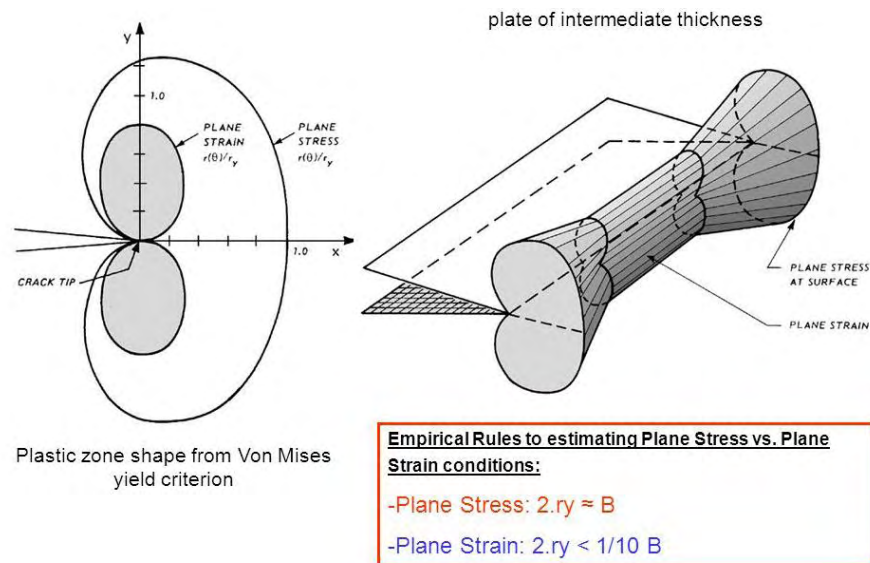
Η τιμή  $\sigma_c$  είναι η κρίσιμη τιμή της τάσης που απαιτείται προκειμένου να διαδοθεί το ρήγμα. Επομένως είναι εμφανές ότι το πρόβλημα αυτό είναι συνδυαστικό, αφού η  $\sigma_c$  εξαρτάται τόσο από τα χαρακτηριστικά του υλικού ( $K_C$ ) όσο και από το μήκος της ρωγμής  $a$ .

### 2.3 Επίπεδη ένταση και επίπεδη παραμόρφωση

Η κρίσιμη τιμή του συντελεστή έντασης τάσεως  $K$  αναφέρεται σε μία εντατική κατάσταση όπου η ρωγμή διαδίδεται με ασταθή τρόπο χωρίς να απαιτείται αύξηση του εξωτερικού φορτίου ή της εφαρμοζόμενης ενέργειας. Όπως ήδη αναφέρθηκε η τιμή αυτή  $K_C$  εξαρτάται τόσο από τις εφαρμοζόμενες τάσεις και το περιβάλλον όσο και από το μήκος της ρωγμής, το υλικό και την γεωμετρία του.

Μία από τις πιο βασικότερες παραμέτρους που καθορίζουν την τιμή της αντοχής θραύσεως  $K_C$  είναι το πάχος του δοκιμίου το οποίο μελετάται. Αυτό συμβαίνει καθώς ανάλογα με το πάχος του δοκιμίου καθορίζεται και η εντατική κατάσταση που επικρατεί στην αιχμή της ρωγμής. Οι δύο εντατικές καταστάσεις που καθορίζονται από πάχος του δοκιμίου είναι οι εξής:

- **Επίπεδη παραμόρφωση (plane strain):** ισχύει για μεγάλα πάχη δοκιμίου
- **Επίπεδη ένταση (plane stress):** ισχύει για μικρά πάχη δοκιμίου



Εικόνα 2-3: Περιοχές επίπεδης έντασης και επίπεδης παραμόρφωσης στην αιχμή ενός ρήγματος

Η **συνθήκη επίπεδης παραμόρφωσης** για ένα υλικό είναι η εξής:

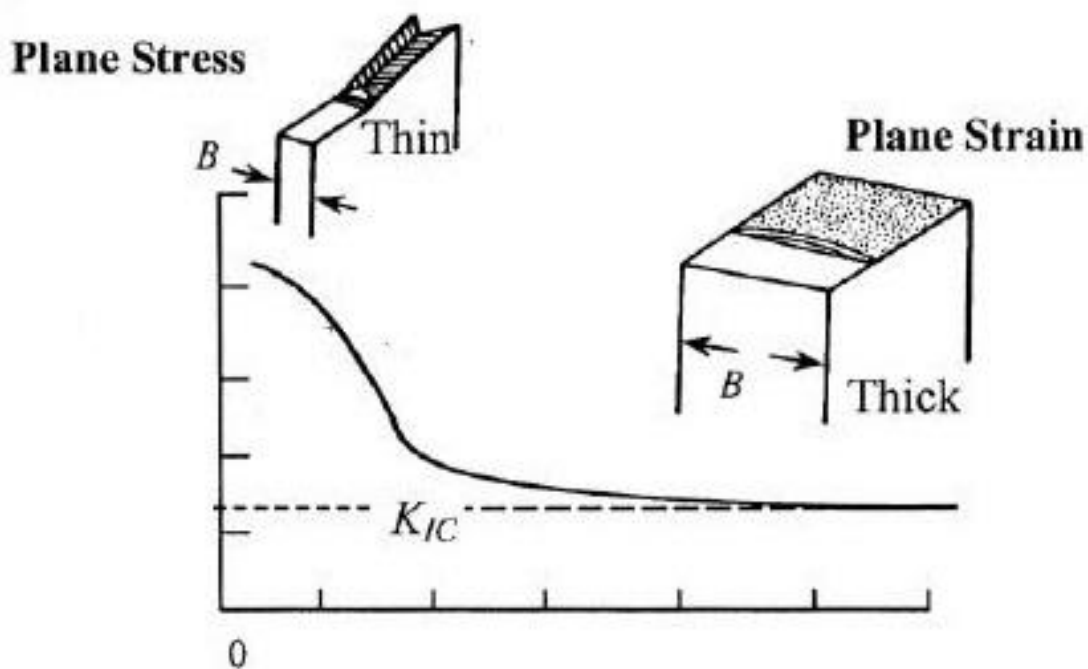
$$T, (b-a), \alpha, h \geq 2, 5 \left( \frac{K}{\sigma_y} \right)^2 \quad (2.7)$$

Όπου όλες οι διαστάσεις είναι οι ίδιες με αυτές που παρουσιάζονται στην εικόνα 2-2. [3]

Αν δεν ισχύει η παραπάνω σχέση τότε στην αιχμή της ρωγμής επικρατούν οι ιδιότητες της επίπεδης έντασης.

Η γνώση της εντατικής κατάστασης είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό της κρίσιμης τιμής  $K_{IC}$  καθώς δεν αποτελεί ιδιότητα του υλικού αλλά μεταβάλλεται ανάλογα με το πάχος του δοκιμίου όπως φαίνεται και στο σχήμα 2-3. Συγκεκριμένα:

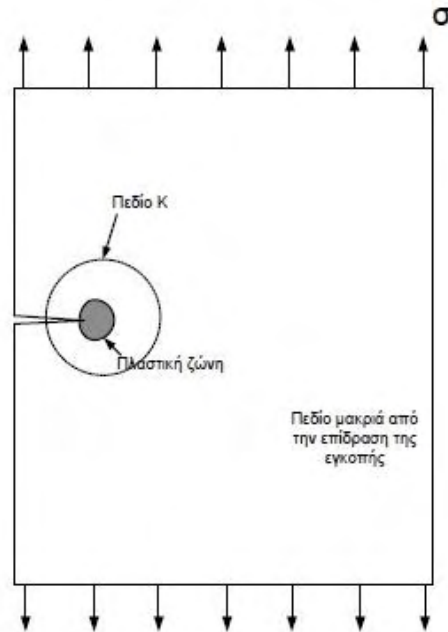
- Για μικρά πάχη η τιμή  $K_{IC}$  είναι μεγάλη ενώ μειώνεται εκθετικά όσο μεγαλώνει το πάχος. Αυτό σημαίνει ότι στις περιπτώσεις όπου επικρατεί επίπεδη ένταση η κρίσιμη τιμή του συντελεστή  $K_I$  δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται ανάλογα με τις διαστάσεις του δοκιμίου
- Για μεγάλα πάχη που ξεπερνούν μια κρίσιμη τιμή ( $t_{kp} = 2,5(\frac{K}{\sigma_y})^2$ ) η κρίσιμη τιμή του συντελεστή  $K_I$  σταθεροποιείται σε μία τιμή η οποία ονομάζεται **δυσθραυστότητα  $K_{IC}$**  και αποτελεί ιδιότητα του υλικού που μελετάται.



Σχήμα 2-2: Επίδραση του πάχους στην κρίσιμη τιμή του συντελεστή έντασης τάσεων

## 2.4 Όρια της γραμμικής ελαστικής θεωρίας - Συνθήκη μικρής πλαστικότητας

Όσο η ρωγμή βρίσκεται σε ένα ομογενές εντατικό πεδίο ο συντελεστής  $K$  μπορεί να υπολογιστεί με μεγάλη ακρίβεια. Ωστόσο για πολύπλοκα εντατικά πεδία η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα δύσκολη.



Εικόνα 2-4: Πλαστική ζώνης ρωγμής και μέγεθος πεδίου  $K$

Όταν η πλαστική ζώνη περιορίζεται σε μια μικρή περιοχή γύρω από την αιχμή της ρωγμής και το πεδίο  $K$  είναι κατά πολύ μεγαλύτερο της πλαστικής περιοχής μπορούν να εφαρμοστούν οι αρχές της **Γραμμικής Ελαστικής Θεωρίας των Θραύσεων (LEFM-Linear Elastic Fracture Mechanics)**. Σε αντίθετη περίπτωση όπου η πλαστική ζώνη είναι πολύ μεγαλύτερη σε σύγκριση με το μήκος της ρωγμής ή σε σύγκριση με την απομένουσα διατομή, τότε η Γραμμική Ελαστική Θεωρία θα οδηγήσει σε σφάλμα και επομένως θα πρέπει να εφαρμοστεί η Πλαστική Θεωρία.

Το μέγεθος της πλαστικής ζώνης εξαρτάται από το όριο διαρροής  $\sigma_y$  και τον συντελεστή έντασης τάσεων, ενώ ο υπολογισμός του διαφοροποιείται ανάλογα με την εντατική κατάσταση που επικρατεί στην αιχμή του ρήγματος.

Κατά την εκπόνηση του πειράματος που πραγματοποιείται για τις ανάγκες αυτής της εργασίας η εντατική κατάσταση που επικρατεί είναι αυτή της επίπεδης έντασης καθώς το πάχος του δοκιμίου είναι πολύ μικρό, συγκεκριμένα της τάξης των 1.4mm. Σε αυτή την περίπτωση το μήκος της πλαστικής ζώνης δίνεται από την σχέση:

$$\Gamma_{\pi\lambda} = \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\frac{K}{\sigma_y}\right)^2 \quad (2.8)$$

Για να είναι έγκυροι οι υπολογισμοί και να μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι σχέσεις που αναλύονται σε αυτό το κεφάλαιο θα πρέπει να ισχύουν οι αρχές της γραμμικής ελαστικής θεωρίας, θα πρέπει επομένως το μήκος της πλαστικής ζώνης να είναι μικρότερο από ένα όριο που εξαρτάται από τις διαστάσεις του δοκιμίου και το μήκος της ρωγμής. Το κριτήριο που οριοθετεί την ισχύ της θεωρίας αυτής είναι το εξής:

$$r_{pl} \leq \frac{1}{15} t, \alpha, (b-\alpha), h \quad (2.9)$$

Η παραπάνω σχέση ονομάζεται **συνθήκη για μικρής κλίμακας πλαστικότητα** [3] και ελέγχει αν το μήκος της πλαστικής ζώνης είναι επαρκώς μικρό σε σχέση με τις διαστάσεις του δοκιμίου προκειμένου να μην παραβιάζεται η γραμμική ελαστική θεωρία.

Ο έλεγχος αυτός θα πρέπει να γίνεται καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος, ενώ όταν τα πειραματικά δεδομένα παύουν να πληρούν τη συνθήκη θα πρέπει να σταματά η καταγραφή τους καθώς δεν θα αποτελούν πια αποδεκτά αποτελέσματα.

Από τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι το τέλος της πειραματικής διαδικασίας θα καθορίζεται είτε από την θραύση του δοκιμίου είτε από την παραβίαση της συνθήκης της μικρής κλίμακας πλαστικότητας.

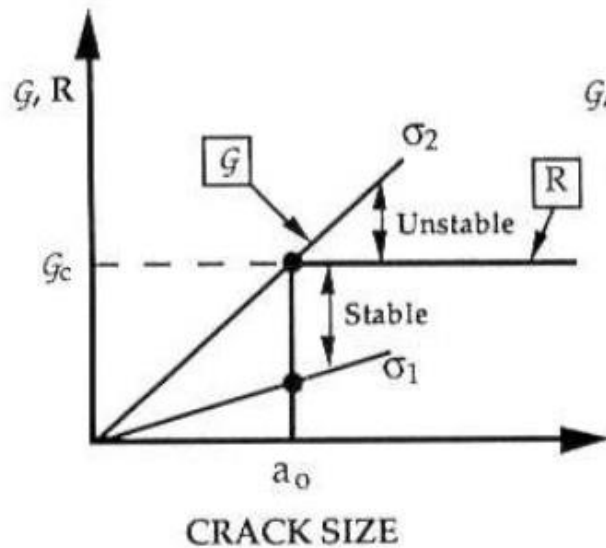
## 2.5 Καμπύλες αντίστασης στη θραύση

Σε υλικά που έχουν μοντελοποιηθεί με βάση την γραμμική ελαστική θεωρία των θραύσεων (LEFM), η εξέλιξη μιας ήδη υπάρχουσας ρωγμής λαμβάνει χώρα όταν ο ρυθμός απελευθέρωσης της ελαστικής ενέργειας  $G$  γίνει ίσος με την τιμή της **αντίστασης του υλικού σε εξέλιξη της ρωγμής  $R$** . Ιδιαίτερα σημαντικός επομένως για την μελέτη της συμπεριφοράς του υλικού καθίσταται ο σχεδιασμός της καμπύλης της αντίστασης  $R$  σε σχέση με την μεταβολή του μήκους της ρωγμής  $\Delta a$ , η οποία ονομάζεται **καμπύλη αντίστασης του υλικού σε εξέλιξη ρωγμής**.

Μια τέτοια καμπύλη προκύπτει μέσω πειραματικής διαδικασίας κατά την οποία επιβάλλονται στο υλικό φορτία τέτοια ώστε να προκύπτει αργή και σταθερή εξέλιξη ρήγματος από μία αιχμηρή ειδικά διαμορφωμένη εγκοπή. Ουσιαστικά οι καμπύλες αυτές αποτελούν μία καταγραφή της αντοχής του υλικού καθώς η ρωγμή εξελίσσεται ομαλά κάτω από συνεχώς αυξανόμενη τιμή του συντελεστή έντασης τάσεων  $K$ .

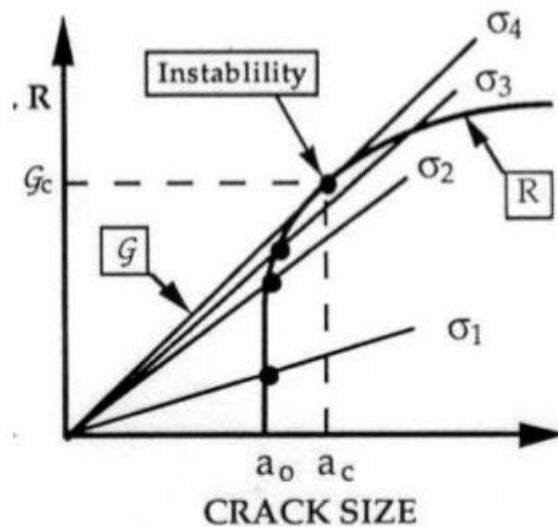


Η μορφή της καμπύλης αυτής εξαρτάται από το υλικό και μπορεί να κατέχει κατά κύριο λόγο δύο μορφές. Η πρώτη αφορά τα ψαθυρά υλικά, και η μορφή της καμπύλης είναι μία ευθεία γραμμή. Σε αυτή την περίπτωση, η αντίσταση  $R$  του υλικού δεν μεταβάλλεται με το μήκος της ρωγμής. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2-3, όταν η τιμή της τάσης είναι ίση με  $\sigma_1$  η ρωγμή είναι σταθερή, ενώ αντίθετα όταν η τιμή της τάσης γίνει ίση με  $\sigma_2$  η εξέλιξη του ρήγματος γίνεται ασταθής και η κινούσα δύναμη αυξάνεται με την εξέλιξη του ρήγματος.



Σχήμα 2-3: Καμπύλη δυσθραυστότητας ενός ψαθυρού υλικού

Η δεύτερη περίπτωση αφορά όλκιμα υλικά και παρουσιάζει μία καμπύλη  $R$  της οποίας η μορφή είναι κυρτή. Όσο η τιμή της τάσης είναι χαμηλή το ρήγμα προχωρά με αργό ρυθμό και η εξέλιξη του είναι σταθερή. Όταν ωστόσο η τάση ξεπεράσει την κρίσιμη τιμή  $\sigma_4$ , ο ρυθμός εξέλιξης της ρωγμής αυξάνεται, γεγονός το οποίο οφείλεται στο ότι η κινούσα δύναμη ξεπερνά την κλίση της αντίστασης  $R$  με αποτέλεσμα η εξέλιξη του ρήγματος να καθίσταται ασταθής από αυτό το σημείο και μετά. [4]



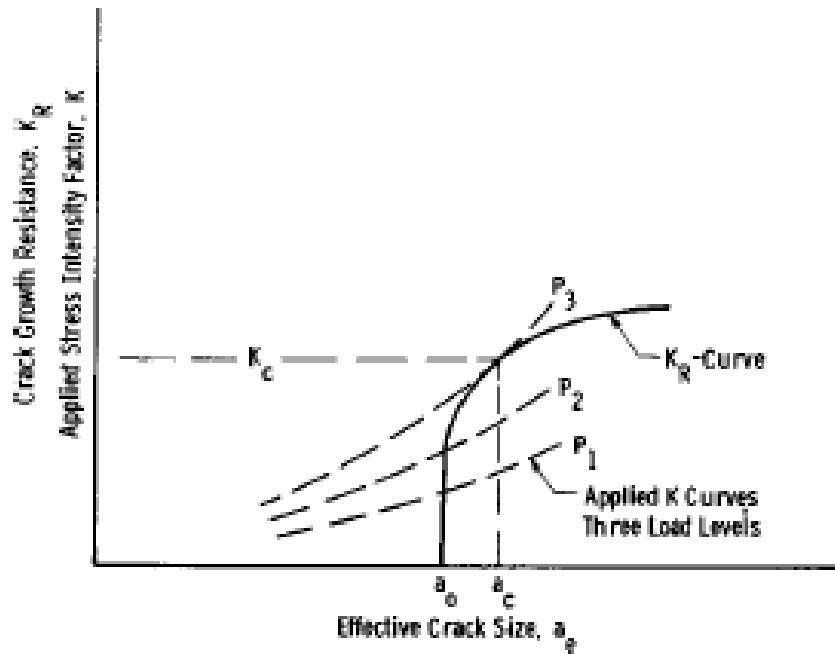
Σχήμα 2-4: Καμπύλη δυσθραυστότητας ενός όλκιμου υλικού

Παρόλο που η μορφή των παραπάνω διαγραμμάτων εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το υλικό, το μέγεθος και η γεωμετρία του υπό μελέτη δοκιμίου μπορεί να επηρεάσει την μορφή τους. Τα λεπτά δοκίμια για παράδειγμα παρουσιάζουν μία πιο απότομη καμπύλη δυσθραυστότητας σε σχέση με άλλα πιο παχιά δοκίμια ίδιας γεωμετρίας εξαιτίας της επίπεδης έντασης που παρουσιάζουν σε αντίθεση με την επίπεδη παραμόρφωση που παρουσιάζουν τα πιο μεγάλα πάχους ελάσματα. Ακόμα, τα αποτελέσματα διαφέρουν όταν η ρωγμή πλησιάσει σε ελεύθερο άκρο του δοκιμίου, καθιστώντας διαφορετικά τα αποτελέσματα που προκύπτουν από ένα στενό και ένα πλατύ έλασμα. Όλες αυτές οι διαφοροποιήσεις θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τόσο κατά την διεξαγωγή του πειράματος όσο και κατά τον σχεδιασμό των καμπυλών.

Τα παραπάνω διαγράμματα αποτελούν πολύτιμο εργαλείο κατά την μελέτη διάδοσης ρήγματος ενός υλικού αφού από αυτά μπορεί να διεξαχθεί η τιμή της κρίσιμης τιμής του συντελεστή έντασης τάσεων  $K_{IC}$  του υλικού, η οποία για λεπτά ελάσματα θα εξαρτάται από το πάχος του υπό μελέτη δοκιμίου ενώ για ελάσματα μεγαλύτερου πάχους θα είναι σταθερή και ίση με την δυσθραυστότητα του υλικού  $K_{IC}$ .

Ο υπολογισμός της τιμής  $K$ , του μήκους ρωγμής  $a$  καθώς και της τιμής της **ανίστασης του υλικού σε εξέλιξη ρωγμής  $K_R$**  (η οποία είναι ουσιαστική η αντίσταση  $R$  μεταφρασμένη μέσω ειδικών τύπων σε μονάδες ίδιες με αυτές του συντελεστή έντασης τάσεως  $K$ ) γίνεται μέσω των πειραματικών δεδομένων με την χρήση της **μεθόδου ενδοτικότητας (CTOD)** που περιγράφεται στην προδιαγραφή **ASTM E561 – 98**. [5]

Μετά το σχεδιασμό του διαγράμματος αντίστασης  $K_R$ - μήκους ρωγμής  $a$ , μπορεί να γίνει ο υπολογισμός της κρίσιμης τιμής  $K_C$  με τον σχεδιασμό των καμπυλών εφαρμοσμένου  $K$ - μήκους ρωγμής  $a$  για σταθερή τιμή φορτίου όπως φαίνεται στο σχήμα 2-5. Η τιμή  $K_C$  θα είναι αυτή για την οποία η καμπύλη  $K$ - $a$  θα εφάπτεται του διαγράμματος  $K_R$ - $a$  και αντιστοιχεί στο σημείο επαφής των δύο καμπυλών.



Σχήμα 2-5: Καμπύλη δυσθραυστότητας ενός όλκιμου υλικού και μέθοδος υπολογισμού της τιμής  $K_C$

## Κεφάλαιο 3: Χάλυβας TRIP

### 3.1 Γενικά

Οι χάλυβες TRIP οφείλουν την ονομασία τους στο **φαινόμενο TRIP**, το οποίο είναι ένας μαρτενσιτικός μετασχηματισμός που προκαλείται από την επίδραση των μηχανικών τάσεων που ασκούνται στο υλικό.

Η μικροδομή των χαλύβων αυτών αποτελείται κυρίως από τρεις φάσεις: φερρίτη, μπαινίτη και υπολειπόμενου ωστενίτη, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις έχει ανιχνευθεί και μαρτενσίτης. Η φάση η οποία καθορίζει το φαινόμενο TRIP είναι ο **μετασταθής ωστενίτης** ο οποίος μετατρέπεται σε μαρτενσίτη κατά την εφαρμογή μηχανικών τάσεων ή πλαστικών παραμορφώσεων. Για την δημιουργία αυτής της μικροδομής απαιτείται χαμηλή κραμάτωση και μια καλά ελεγχόμενη θερμική κατεργασία. [6]

Το φαινόμενο TRIP συνοδεύεται από σταθεροποίηση της πλαστικής ροής με αποτέλεσμα την αύξηση της ομοιόμορφης παραμορφώσεως και της διαμορφωσιμότητας. Επομένως οι χάλυβες αυτοί εμφανίζουν εξαιρετική ισορροπία μεταξύ αντοχής και ολκιμότητας καθώς και μεγάλη δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας (high-energy absorption potential). Οι ιδιότητες που κάνουν τον χάλυβα αυτόν να ξεχωρίζει οφείλονται στον συνδυασμό της φερριτικής φάσης (ευπλαστότητα), της μπαινιτικής φάσης (αντοχή) και του παραμένουω ωστενίτη (ομοιόμορφη παραμόρφωση μέσω του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού).

Λόγω όλων των παραπάνω, στην αυτοκινητοβιομηχανία γίνεται ευρεία χρήση των πολυφασικών χαλύβων. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται σε εκείνα τα σημεία του οχήματος τα οποία θα δεχθούν την ενέργεια της κρούσης κατά την σύγκρουση ενώ πολλές εταιρίες τα επιλέγουν για την διαμόρφωση των σκελετών τους.



Εικόνα 3-1: Σημεία του αμαξώματος όπου χρησιμοποιείται χάλυβας TRIP

Ένας τυπικός χάλυβας TRIP εμπεριέχει τα εξής στοιχεία: [7]

C	Mn	Si
0.2 - 0.4 % κ.β.	1 - 2.5 % κ.β.	1.2 - 2 % κ.β.

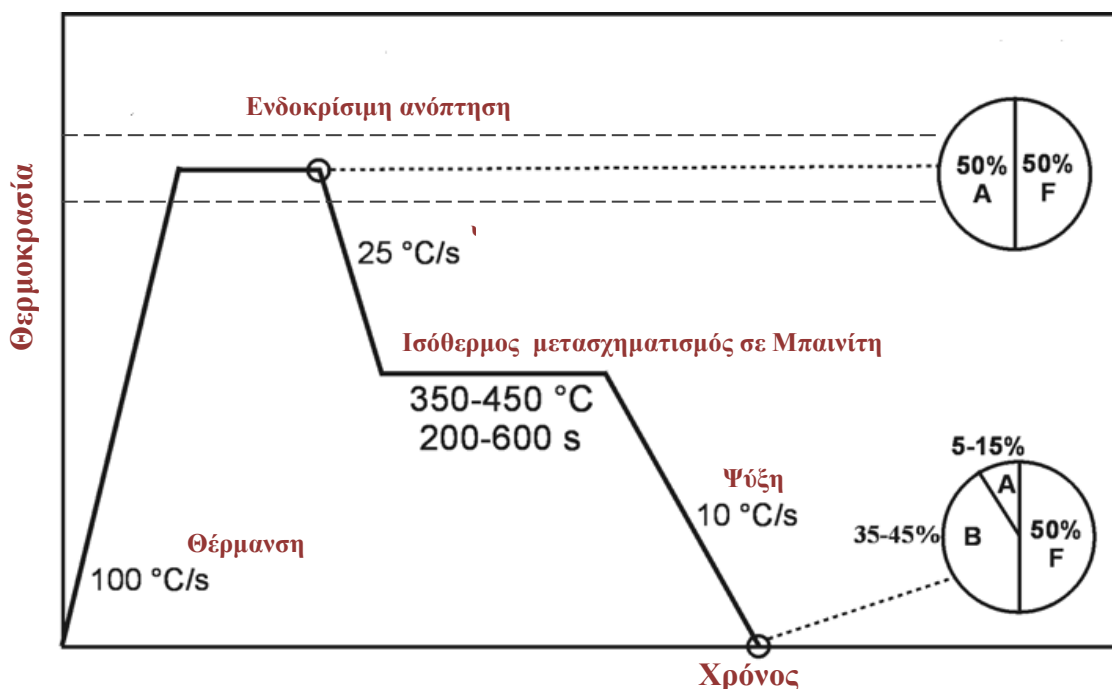
**Πίνακας 3-1: Κύρια κραματικά στοιχεία ενός τυπικού χάλυβα TRIP**

Η μικροδομή τους αποτελείται από 50-60% κ.ο. αλλοτριόμορφο φερρίτη, 20-30% κ.ο. ελεύθερο καρβιδίων μπαινίτη και υπολειπόμενο ωστενίτη σε ποσοστό 10-30% κ.ο.. Εμφανίζεται επίσης και ένα μικρό ποσοστό μαρτενσίτη.

### 3.2 Διαδικασία παραγωγής

Σημαντικότερο κομμάτι κατά την διαδικασία διαμόρφωσης της μικροδομής ενός χάλυβα TRIP είναι η διατήρηση της διασποράς του ωστενίτη σε θερμοκρασία δωματίου. Στο εμπόριο κυκλοφορούν δύο είδη χάλυβα TRIP που κατηγοριοποιούνται με βάση τον τρόπο παραγωγής τους. Το πρώτο είδος είναι οι χάλυβες **ψυχρής έλασης (cold rolled)**. Σε αυτούς τους χάλυβες η παραγωγή επιτυγχάνεται μέσω μιας θερμικής κατεργασίας δύο σταδίων που αποτελείται από **ενδοκρίσιμη ανόπτηση** και από **ισοθερμοκρασιακή παραμονή στην μπαινιτική περιοχή**.

Η αρχική δομή ενός χάλυβα TRIP με τυπική σύσταση Fe-0.2C-1Mn-1Si είναι φερριτοπλαστική. Στο πρώτο στάδιο ο χάλυβας υφίσταται ενδοκρίσιμη ανόπτηση μεταξύ των θερμοκρασιών A1 και A3 (Σχήμα 3-1) έτσι ώστε να σχηματιστεί ένα μίγμα φερρίτη και ωστενίτη σε ποσοστά περίπου 50%. Στη συνέχεια ο χάλυβας φέρεται σε μία χαμηλότερη θερμοκρασία όπου γίνεται ισόθερμος μετασχηματισμός του ωστενίτη σε μπαινίτη. Ο σχηματισμός του μπαινίτη κατά την διάρκεια του μπαινιτικού μετασχηματισμού αποτρέπεται εξαιτίας της υψηλής περιεκτικότητας του χάλυβα σε πυρίτιο. Επομένως ο άνθρακας που αποβάλλεται από τον μπαινίτη περιέρχεται στον υπολειπόμενο ωστενίτη. Η ισόθερμη παραμονή διακόπτεται πριν ολοκληρωθεί ο μπαινιτικός μετασχηματισμός και να παραμείνει ένα ποσοστό ωστενίτη της τάξεως του 10%. Ο εμπλουτισμός του ωστενίτη σε άνθρακα κατά τον μπαινιτικό μετασχηματισμό είναι αυτός που μειώνει την θερμοκρασία μετασχηματισμού σε μαρτενσίτη Ms σε τιμές κάτω από την θερμοκρασία δωματίου, έχοντας ως αποτέλεσμα ο παραμένων ωστενίτης να μην μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη κατά την ψύξη του χάλυβα. Ο εμπλουτισμός του σε άνθρακα είναι επομένως το στοιχείο που καθορίζει την σταθεροποίηση του ωστενίτη σε θερμοκρασία δωματίου. [7]



Σχήμα 3-1: Θερμική κατεργασία για την παραγωγή χάλυβα TRIP

Το δεύτερο είδος χάλυβα TRIP είναι οι χάλυβες **θερμής έλασης (hot rolled)**. Η διαδικασία παραγωγής τους συνίσταται στην απόψυξη ενός πλήρως ωστενιτικού ελάσματος το οποίο έχει υποστεί θερμή έλαση στην θερμοκρασία περιβάλλοντος με παραμονή στις θερμοκρασίες ενδοκρίσιμης ανόπτησης και μπαινιτικής βαφής για τη δημιουργία της μικροδομής των χαλύβων TRIP με τον τρόπο που περιεγράφηκε παραπάνω. Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η απευθείας παραγωγή της μικροδομής στις τελικές διαστάσεις του ελάσματος. Η διαδικασία είναι ιδιαίτερος φθηνή καθώς τα ελάσματα δεν χρειάζεται να θερμανθούν εκ νέου στη θερμοκρασία ενδοκρίσιμης ανόπτησης όπως συμβαίνει με την μέθοδο παραγωγής των χαλύβων ψυχρής έλασης. Ωστόσο, οι χάλυβες θερμής έλασης παράγονται με περιορισμό στο πάχος του ελάσματος έως 3mm, με δυνατότητα έως και 1.4mm σε κάποια σύγχρονα ελάστρα αντίθετα με αυτούς της ψυχρής έλασης οι οποίοι συνήθως παράγονται και σε μικρότερα πάχη. Οι χάλυβες θερμής έλασης προτιμώνται σε εφαρμογές της αυτοκινητοβιομηχανίας στις οποίες το κόστος παίζει πρωταρχικό ρόλο στην επιλογή του υλικού. [8]

### 3.3 Μηχανικές ιδιότητες

Ο λόγος που οι χάλυβες TRIP χρησιμοποιούνται σε τόσο μεγάλο εύρος είναι η βελτιωμένη μηχανική συμπεριφορά που παρουσιάζουν σε σχέση τόσο με συμβατικούς δομικούς χάλυβες όσο και σε σχέση με τους **διφασικούς χάλυβες DP** που επίσης ανήκουν στην κατηγορία Προηγμένων Χαλύβων Υψηλής Αντοχής (Advanced High Strength Steels).

Τόσο οι χάλυβες DP όσο και οι χάλυβες TRIP μπορούν να χαρακτηριστούν ως πολυφασικοί καθώς ενσωματώνουν μία ή περισσότερες πιο σκληρές φάσεις σε μία μαλακή φερριτική μήτρα ενώ χαρακτηρίζονται από βελτιωμένη σχέση σκληρότητας και ολκιμότητας σε σύγκριση με συμβατικούς χάλυβες αντίστοιχης αντοχής.

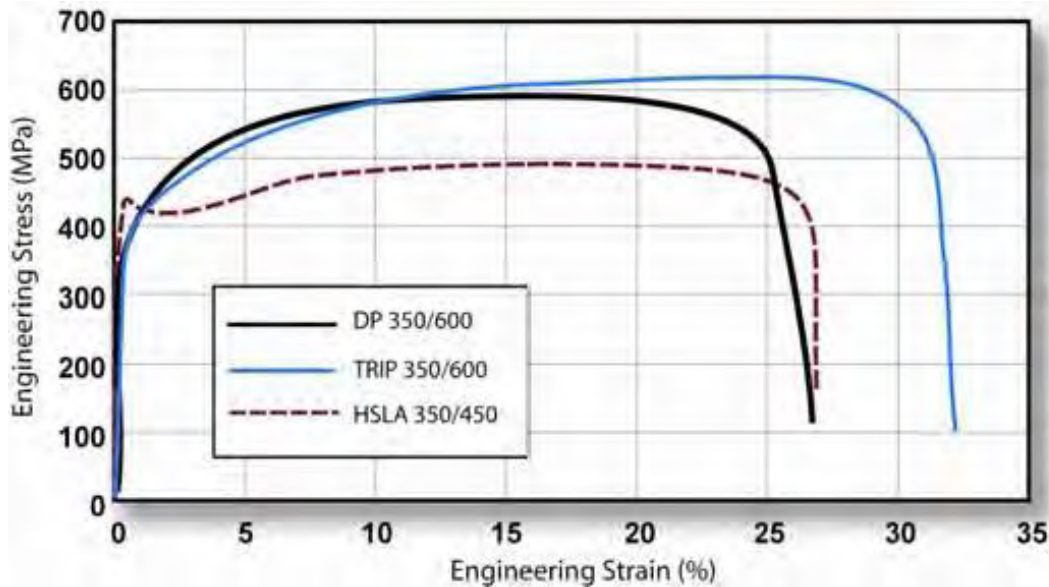
Η μικροδομή των χαλύβων DP, αποτελείται από μια μαλακή μήτρα φερρίτη μέσα στην οποία είναι διασπαρμένες νησίδες σκληρού μαρτενσίτη ή ακόμη και ωστενίτη σε ποσοστό από 10-40%. Η παραγωγή τους γίνεται μέσω κατεργασιών ψυχρής έλασης και συνεχούς ανόπτησης, διαδικασία αντίστοιχη με αυτή των χαλύβων TRIP ενώ η αντοχή τους εξαρτάται από το κλάσμα όγκου και τη σκληρότητα του μαρτενσίτη στη δομή του. Γι' αυτό το λόγο το όριο θραύσης του υλικού κυμαίνεται από 500-1200Μpa. [9]

Σε σχέση με τους χάλυβες TRIP οι χάλυβες DP περιέχουν μικρότερα ποσοστά άνθρακα και πυριτίου ή αλουμινίου, στοιχείων που ευθύνονται για την πολυφασική δομή των χαλύβων αυτών. Τα μεγαλύτερα ποσοστά των χαλύβων TRIP έχουν ως αποτέλεσμα την σταθεροποίηση του ωστενίτη σε θερμοκρασία δωματίου ενώ τα μεγαλύτερα ποσοστά πυριτίου ή/και αλουμινίου επιταχύνουν την μπαινιτική μετατροπή. Τα στοιχεία αυτά επομένως είναι αυτά που καθορίζουν και το φαινόμενο TRIP που διαφοροποιεί τον μηχανισμό παραμόρφωσης των δύο αυτών χαλύβων. [9,10]

Η σύγκριση των ιδιοτήτων των χαλύβων αυτών τόσο μεταξύ τους όσο και σε σχέση με τυπικούς χάλυβες της βιομηχανίας μπορούν να αναλυθούν στα πεδία της παραμορφωσιμότητας, της αντοχής σε σύγκρουση καθώς και της επίδρασης του βάρους στην απορρόφηση ενέργειας.

### 3.3.1 Παραμορφωσιμότητα χαλύβων TRIP

Κατά την παραμόρφωση η διασπορά σκληρότερων φάσεων μέσα στην φερριτική φάση έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού εργοσκληρυνσης του υλικού, φαινόμενο που εμφανίζεται και στα δύο είδη χαλύβων υψηλής αντοχής. Ωστόσο, στους χάλυβες TRIP η σταδιακή μετατροπή του παραμένουτος ωστενίτη σε μαρτενσίτη έχει ως αποτέλεσμα την περαιτέρω αύξηση του ρυθμού εργοσκληρυνσης, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3-2. [10]



Σχήμα 3-2: Σύγκριση των διαγραμμάτων σ-ε για διαφορετικά ήδη χαλύβων

Οι χάλυβες TRIP παρουσιάζουν συνολική παραμόρφωση της τάξης του 15%-30%, ωστόσο από το ποσοστό αυτό μόνο για το 2% φαίνεται να είναι υπεύθυνη η πλαστικότητα του μετασχηματισμού σύμφωνα με την το έργο του Bhadeshia. [11] Επομένως, προκύπτει ότι ο ρόλος του φαινομένου TRIP έχει μεγαλοποιηθεί σε ότι αφορά την συνεισφορά του στις βελτιωμένες ιδιότητες του χάλυβα αυτού.

Πιο συγκεκριμένα, οι σκληρές φάσεις τόσο στους χάλυβες TRIP όσο και στους χάλυβες DP έχουν υψηλό ρυθμό εργοσκληρυνσης και αντοχή και χαμηλή παραμορφωσιμότητα. Αντίθετα, ο φερρίτης, ως πιο μαλακή φάση, έχει χαμηλό δείκτη εργοσκληρυνσης και αντοχή ενώ ταυτόχρονα υψηλή παραμορφωσιμότητα. Κατά την επιβολή τάσεων στο υλικό, ο μηχανισμός της πλαστικής παραμόρφωσης πρώτα επικεντρώνεται στην πιο μαλακή φάση η οποία εργοσκληρύνεται ενώ τελικά παραμορφώνονται πλαστικά και οι σκληρότερες φάσεις. Η διαδικασία παραμόρφωσης αυτών των σύνθετων υλικών έχει αποδειχθεί ότι οδηγεί στο καλύτερο συνδυασμό ιδιοτήτων που αναλύθηκε παραπάνω.

Επομένως, ο μηχανισμός αυτός είναι ωφέλιμος αντίστοιχα και για τους χάλυβες DP και για τους χάλυβες TRIP με την παρουσία παραμένουτος ωστενίτη να παίζει λιγότερο κυρίαρχο ρόλο στους δεύτερους. [11]

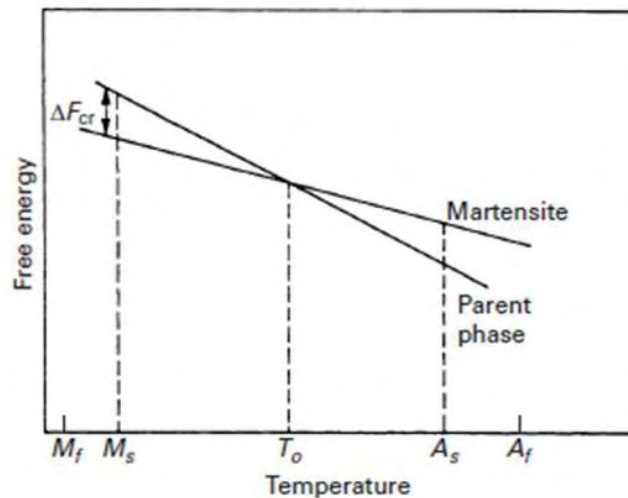


### 3.4 Χαρακτηριστικά του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού

Ο μετασχηματισμός του παραμένουτος ωστενίτη σε μαρτενσίτη αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στο χάλυβα TRIP, καθιστώντας το τόσο δημοφιλές υλικό. Στην πράξη πρόκειται για μία δομική αλλαγή του υλικού χάρη στην οποία επιτυγχάνεται σημαντική ισχυροποίηση του υλικού, για αυτό και έχει ξεχωρίσει στην επεξεργασία των υλικών και ιδιαίτερα των χαλύβων.

Τα τρία βασικά χαρακτηριστικά που διέπουν τον μετασχηματισμό αυτό είναι τα εξής [7]:

**Είναι μη διαχυτικός (diffusionless):** Ο μετασχηματισμός του μαρτενσίτη μπορεί αν συμβεί σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες όπου η ατομική κινητικότητα είναι πολύ μικρή ενώ η διάχυση των ατόμων δεν είναι δυνατή εντός της χρονικής κλίμακας του μετασχηματισμού [11]. Η κινούσα δύναμη της αντίδρασης αυξάνεται με την μείωση της θερμοκρασίας και ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός ξεκινά στην θερμοκρασία  $M_s$ , όπου η τιμή της κινούσας δύναμης λαμβάνει κρίσιμη τιμή με την οποία είναι δυνατή η πυρήνωση του μετασχηματισμού.



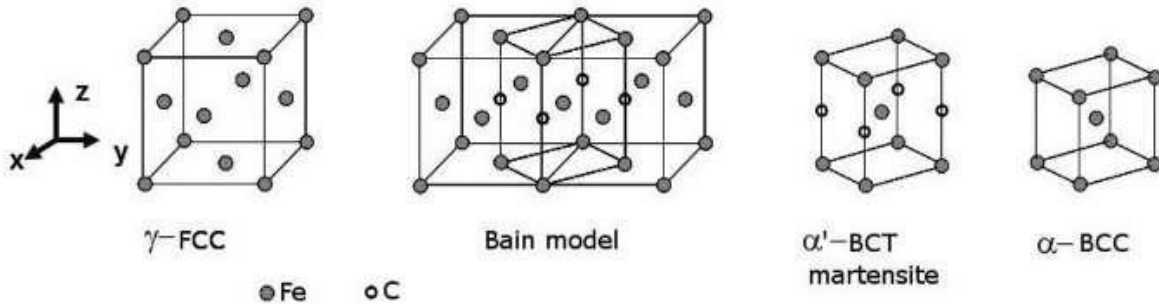
Σχήμα 3-3: Καμπύλες ελεύθερης ενέργειας-θερμοκρασίας για μητρική και ωστενιτική φάση

**Είναι μετατοπιστικός (displacive):** Πραγματοποιείται από τη συνεργατική μετατόπιση των ατόμων έτσι ώστε να προκύπτει πάντα αντιστοιχία μεταξύ των αρχικών και των τελικών θέσεων. Αυτές οι συνεργατικές μετατοπίσεις προέρχονται από ένα συνδυασμό δύο τύπων παραμορφώσεων:

- Ομογενής παραμόρφωση πλέγματος (homogenous lattice transformation): Είναι το τμήμα που προκαλεί την αλλαγή του κρυσταλλικού πλέγματος. Το κρυσταλλικό πλέγμα από την αρχική φάση FCC (ωστενιτική δομή) μετατρέπεται σε δομή BCC. Ωστόσο εξαιτίας των

ατόμων άνθρακα που βρίσκονται παγιδευμένα στις ενδιάμεσες θέσεις, η τελική δομή που λαμβάνει το υλικό είναι BCT. Ο μετασχηματισμός αυτός ονομάζεται αλλιώς και παραμόρφωση Bain.

- Ανακατανομές: Συνεργατικές μετατοπίσεις ατόμων στο εσωτερικό της κυψελίδας που μπορούν να προκαλέσουν αλλαγή της δομής χωρίς ωστόσο να προκαλέσουν παραμόρφωση του πλέγματος. Είναι λιγότερο έντονες από την ομογενή παραμόρφωση του πλέγματος. [12]



Εικόνα 3-2: Αντιστοιχία πλεγμάτων για τον μετασχηματισμό FCC σε BCT στους χάλυβες

**Η κινητική και η μορφολογία του εξαρτώνται από την ενέργεια παραμορφώσεως η οποία προέρχεται κυρίως από διατμητικές παραμορφώσεις:** Η στρεπτική ενέργεια που επικρατεί κατά τις διατμητικές παραμορφώσεις έχει σημαντικές επιδράσεις τόσο στην κινητική του μετασχηματισμού όσο και την μορφολογία του προϊόντος του μετασχηματισμού. Οι κρύσταλλοι του μαρτενσίτη διαμορφώνονται έτσι ώστε να μειωθεί η ενέργεια αυτή.

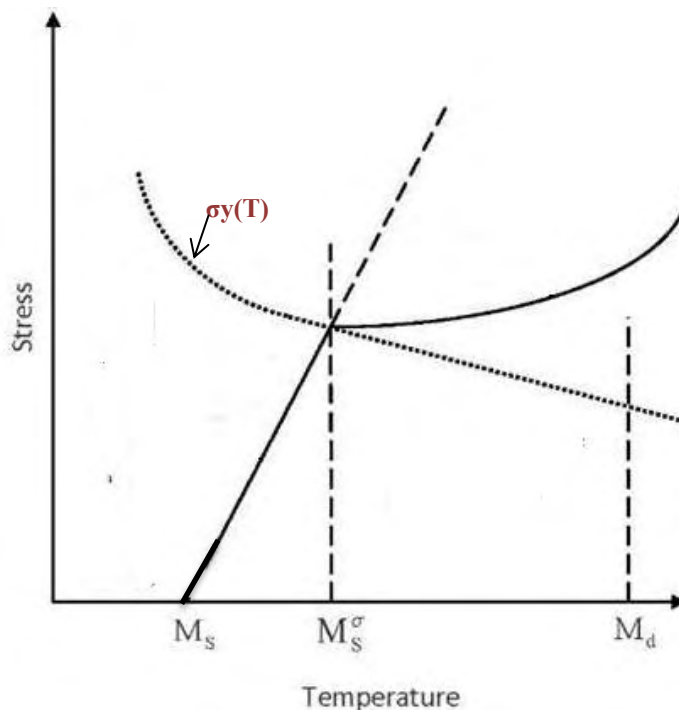
### 3.5 Πλαστικότητα μετασχηματισμού

Η ιδιαιτερότητα που παρουσιάζουν οι χάλυβες TRIP έγκειται στον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό που λαμβάνει χώρα με την επιβολή μηχανικών φορτίων, χαρακτηριστικό που τους ξεχωρίζει από όλα τα άλλα ήδη δομικών χαλύβων. Η ανάπτυξη των χαλύβων αυτών έγινε ακριβώς με σκοπό την αξιοποίηση του φαινομένου αυτού καθώς και της πλαστικότητας του μετασχηματισμού που λαμβάνει χώρα.

Χωρίς την παρουσία εξωτερικά επιβαλλόμενων φορτίων ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός ξεκινά αυτόματα σε προϋπάρχουσες θέσεις πυρηνώσεως κατά την ψύξη του υλικού, όταν η θερμοκρασία γίνει μικρότερη της θερμοκρασίας  $M_s$ . Ωστόσο, είναι δυνατόν ο μετασχηματισμός του ωστενίτη σε μαρτενσίτη να λάβει χώρα σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες της  $M_s$ . Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην κινούσα δύναμη  $\Delta G_\sigma$  που δημιουργεί η εξωτερική μηχανική τάση που επιβάλλεται στο υλικό. Η  $\Delta G_\sigma$  προστίθεται στην χημική κινούσα δύναμη  $\Delta G_{ch}$  συνεισφέροντας έτσι στην κρίσιμη κινούσα δύναμη στην οποία οφείλεται η έναρξη του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού. Όσο μεγαλύτερη

είναι η διαφορά της θερμοκρασίας από την  $M_s$  τόσο μεγαλύτερη είναι και η τάση που απαιτείται προκειμένου να ενεργοποιηθεί ο μηχανισμός μετασχηματισμού. Η τάση που απαιτείται ωστόσο δεν ακολουθεί γραμμική σχέση όπως θα αναμενόταν. Αντίθετα, εξαρτάται από την θερμοκρασία και μπορεί να χωριστεί σε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις, οι οποίες παρουσιάζονται σχηματικά και στο σχήμα 3-4. Πιο συγκεκριμένα:

- $M_s < T < M_s^\sigma$ : Μαρτενσιτική πυρήνωση **υποβοηθούμενη από την τάση (stressed-assisted nucleation)**. Οι τάσεις βρίσκονται σε τιμές μικρότερες από την τάση διαρροής του υλικού της μητρικής φάσεως. [13]
- $M_s^\sigma < T < M_d$ : Λόγω της πλαστικής παραμορφώσεως δημιουργούνται νέες και δυναμικότερες θέσεις πυρήνώσεως, για αυτό και η τάση που απαιτείται για τον μετασχηματισμό της φάσης δεν ακολουθεί την ευθεία AB. Η μαρτενσιτική πυρήνωση σε αυτή την περιοχή του διαγράμματος ονομάζεται **προκαλούμενη από την παραμόρφωση (strain-induced nucleation)**
- $T > M_d$ : Η χημική κινούσα δύναμη είναι πολύ μικρή και κατ' επέκταση δεν είναι δυνατή η πραγματοποίηση της μαρτενσιτικής πυρήνωσης όσο μεγάλη και αν είναι η επιβαλλόμενη τάση ή παραμόρφωση.



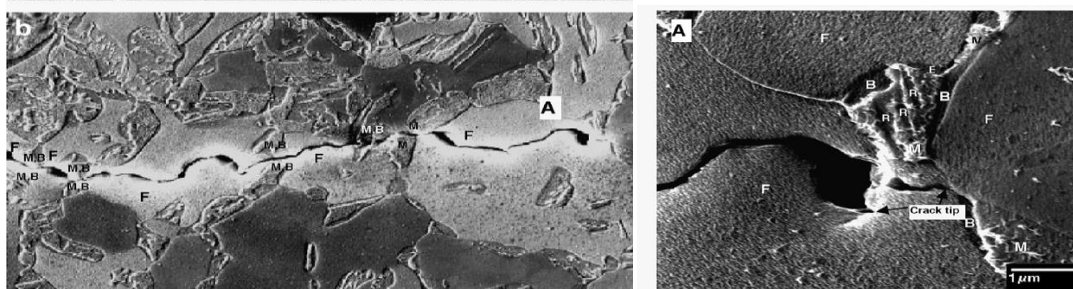
Σχήμα 3-4: Σχηματική παράσταση μαρτενσιτικού μετασχηματισμού υπό την επιρροή εξωτερικών τάσεων

Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός λειτουργεί ως ένας μηχανισμός παραμόρφωσης όπως ακριβώς η ολίσθηση αταξιών και οι μηχανικές διδυμίες. Η συνεισφορά της μαρτενσιτικής παραμόρφωσης μορφής που λαμβάνει χώρα για  $T < M_s^s$  ονομάζεται **πλαστικότητα του μετασχηματισμού (Transformation-induced plasticity, TRIP)**, ενώ για  $T > M_s^s$  η πλαστική διαρροή προκαλείται από ολίσθηση αταξιών στη μητρική φάση. [7]

### 3.6 Διάδοση ρωγμών στο χάλυβα TRIP

Η επιτυχία και η εκτεταμένη χρήση του χάλυβα TRIP, όπως αναλύθηκε και στις προηγούμενες παραγράφους, οφείλεται στο συνδυασμό υψηλής αντοχής και παραμορφωσιμότητας. Ωστόσο, έχουν επανειλημμένα αναφερθεί προβλήματα τα οποία αφορούν τη δυσθραυστότητα του υλικού και την αντίστασή του σε εξέλιξη ρωγμής, κυρίως σε υλικά που περιλαμβάνουν εγκοπή ή κάποια άλλη ατέλεια, με αποτέλεσμα να οδηγούνται σε αρκετές περιπτώσεις είτε σε θραύση κατά την μορφοποίηση του υλικού είτε σε περιορισμένη ικανότητα επέκτασης οπών. Επομένως, η βελτίωση της αντοχής σε θραύση του υλικού χωρίς να επηρεάζεται η αντοχή και η διαμορφωσιμότητα του μπορεί να αποτελεί το κλειδί για την περεταίρω διεύρυνση του φάσματος εφαρμογών των χαλύβων TRIP. Παρόλο που έχουν γίνει εκτεταμένες έρευνες σχετικά με τη συμπεριφορά των χαλύβων TRIP, δεν έχει αποσαφηνιστεί ακόμα η ακριβής σχέση μεταξύ της δυσθραυστότητας του υλικού και του μετασχηματισμού TRIP, του παραμένοντος ωστενίτη καθώς και των μηχανισμών βλάβης που λαμβάνουν χώρα μέσα στην εξελισσόμενη πολυφασική μικροδομή του υλικού ενώ η βιβλιογραφία πάνω στο θέμα είναι αρκετά περιορισμένη. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις διαθέσιμες πηγές θα αναλυθούν συνοπτικά στο παρόν κεφάλαιο.

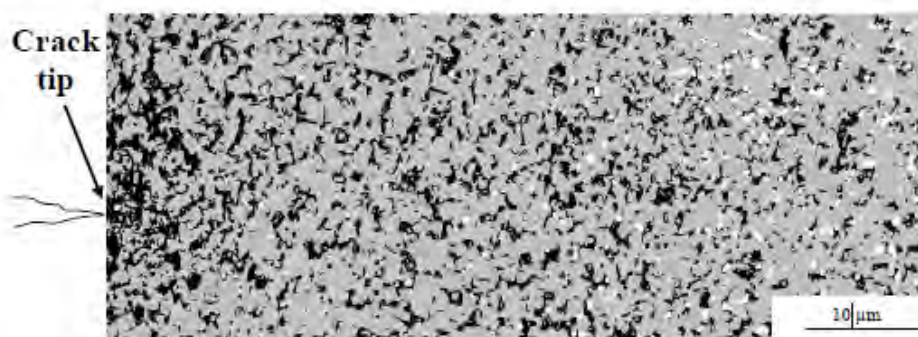
Ένας παράγοντας που επηρεάζει την εξέλιξη της ρωγμής μέσα στον χάλυβα TRIP είναι το «μονοπάτι» που αυτή ακολουθεί ανάμεσα στις διάφορες φάσεις του υλικού (**crack path**). Η ρωγμή κατά τη διάδοσή της συναντά εμπόδια, τα οποία συνιστώνται κυρίως από τις σκληρότερες φάσεις του υλικού (μπαινίτης, μαρτενσίτης, ωστενίτης), με αποτέλεσμα την αλλαγή της κατεύθυνσής της προς μαλακότερες φάσεις (φερρίτη) και προς τα σημεία τομής των φάσεων. Ακόμα, αποδεικνύεται ότι οι περιοχές βλάβης πυρηνώνονται κυρίως μεταξύ φερριτικών και μαρτενσιτικών κόκκων, είτε πιο σπάνια μεταξύ μαρτενσιτικών κόκκων, με αποτέλεσμα η ύπαρξη του μαρτενσίτη να παίζει τον κυριότερο ρόλο κατά τη διάδοση της ρωγμής κάτω από στατικά φορτία. Με βάση τα παραπάνω γίνεται αμέσως σαφές ότι η διάδοση ενός ρήγματος λαμβάνει χώρα υπό την παρουσία μαρτενσιτικής φάσης μόνο αφότου όλο το ποσοστό παραμένοντος ωστενίτη μετατραπεί σε μαρτενσίτη στην άκρη της ρωγμής. [14]



**Εικόνα 3-3: Εικόνες SEM διάδοσης ρωγμής σε χάλυβα TRIP και μεγέθυνση περιοχής A [15]**

Με βάση τα παραπάνω, η σταθερότητα του ωστενίτη είναι μία από τις ιδιότητες που παίζει σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της τιμής δυσθραυστότητας καθώς καθορίζει το μαρτενσιτικό μετασχηματισμό και το μηχανισμό πυρήνωσης κενών (void nucleation) από όπου διαδίδεται η ρωγμή. Ωστόσο, παρά την σημασία της κατά τη διάδοση της ρωγμής, κατά το στάδιο έναρξης της φαίνεται να μην έχει καμία επιρροή. Έτσι, η συμπεριφορά του σταδίου έναρξης ρωγμής ενός χάλυβα TRIP δεν διαφέρει από αυτή ενός χάλυβα DP με το ίδιο ποσοστό μαρτενσίτη και με όμοιο μέγεθος κόκκων. [14]

Όσον αφορά τη σχέση μεταξύ δυσθραυστότητας και παραμένουτος ωστενίτη, από πειράματα που έγιναν σε χάλυβες TRIP με διαφορετικό ποσοστό άνθρακα (και κατ' επέκταση διαφορετικό ποσοστό ωστενίτη) προέκυψε ότι η δυσθραυστότητα του υλικού μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού άνθρακα και ωστενίτη, οδηγώντας στην ευκολότερη διάδοση ρωγμής. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι η τριαξονικότητα του μετασχηματισμού και τα επίπεδα της παραμόρφωσης στην περιοχή κοντά στην άκρη της ρωγμής είναι επαρκή ώστε το μεγαλύτερο ποσοστό του παραμένουτος ωστενίτη να μετασχηματιστεί σε μαρτενσίτη στην περιοχή αυτή (εικόνα 3-4) και επομένως η περαιτέρω διάδοση της ρωγμής να γίνεται δια μέσου μιας περιοχής αποτελούμενης κυρίως από μαρτενσίτη και μικρότερα ποσοστά φερρίτη. Επομένως, εφόσον στα υλικά με μεγαλύτερα ποσοστά ωστενίτη προκύπτουν μεγαλύτερα ποσοστά μαρτενσίτη κατά την επιβολή φορτίων, εμφανίζονται περισσότερες περιοχές βλάβης με αποτέλεσμα να μειώνεται η δυσθραυστότητα του υλικού.

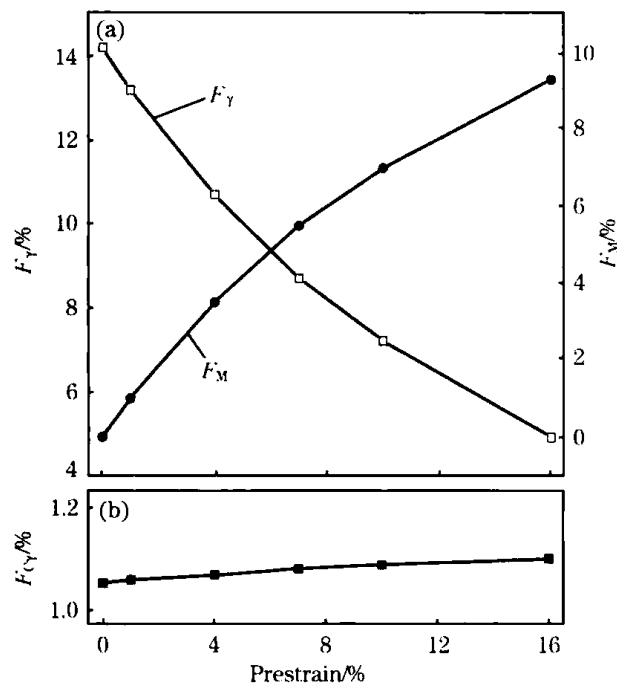


**Εικόνα 3-4: Χάρτης φάσεων στην άκρη ρήγματος υπολογισμένων από OIM σε χάλυβα TRIP 0.45C (μαρτενσίτης με μαύρο χρώμα, ωστενίτης με λευκό, και ο φερρίτης και μπαινίτης με γκρι)**

Ακόμα, η διαφοροποίηση της τιμής της δυσθραυστότητας του χάλυβα TRIP σε σχέση με άλλους δομικούς χάλυβες αποδείχτηκε ότι οφείλεται κατά ένα ποσοστό στην αποτελεσματική πλαστική χαλάρωση που λαμβάνει χώρα κατά το μαρτενσιτικό μετασχηματισμό, η οποία καταστέλλει το σχηματισμό, τη συγχώνευση και την ανάπτυξη κενών καθώς και την θραύση διάσπασης που λαμβάνει χώρα σε υλικά με διαφορετική μικροδομή. [16]

### 3.7 Επίδραση της προέντασης στο ποσοστό παραμένουτος ωστενίτη χάλυβα TRIP

Οι δύο κύριες μεταβλητές που φαίνονται να επηρεάζονται από την επιβολή προεντάσεως σε ένα χάλυβα TRIP οι οποίες συμβάλουν σημαντικά στον καθορισμό των ιδιοτήτων του υλικού είναι το ποσοστό του παραμένουτος ωστενίτη καθώς και η περιεκτικότητα αυτού σε άνθρακα. Μέσω πειραμάτων που έγιναν σε χάλυβα TRIP εμπλουτισμένο με Nb, φάνηκε ότι ενώ το ποσοστό του παραμένουτος ωστενίτη μειώνεται και το ποσοστό του μαρτενσίτη αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού προέντασης που επιβάλλεται στο υλικό, το ποσοστό του άνθρακα της ωστενιτικής φάσης δεν παρουσιάζει κάποια σημαντική διαφοροποίηση. [17]



Σχήμα 3-5: Ποσοστό (α) του παραμένουτος ωστενίτη ( $F_\gamma$ ) και του ποσοστού μαρτενσίτη ( $F_M$ ) και (β) της περιεκτικότητας σε άνθρακα της ωστενιτικής φάσης σε σχέση με το ποσοστό προέντασης



Για το χάλυβα TRIP 700 από τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την εκπόνηση της μεταπτυχιακής διατριβής [18] μέσω της μαγνητικής μεθόδου υπολογίστηκε η αλλαγή στη μικροδομή του συγκεκριμένου υλικού κατά την μονοτονική καταπόνηση σε εφελκυσμό. Συγκεκριμένα αναλύθηκαν τα ποσοστά του παραμένουτος ωστενίτη καθώς και του μεγέθους των κόκκων της φάσης αυτής που παρατηρήθηκαν για τα εύρη αρχικής παραμόρφωσης 4%, 8% και 12% που μελετήθηκαν και στην συνέχεια της παρούσας διπλωματικής.

Με βάση τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, το κλάσμα όγκου του παραμένουτος ωστενίτη στο χάλυβα TRIP 700 για κάθε ένα από τα παραπάνω ποσοστά προέντασης μεταβάλλεται όπως περιγράφεται στον πίνακα 3-2:

Δείγμα	Προένταση(%)	Αρχικό ποσοστό παραμένουτος ωστενίτη (%)	Τελικό ποσοστό παραμένουτος ωστενίτη (%)	Ποσοστό μετασχηματισμού ωστενίτη(%)
1_1	4	15.8	13.0	17.72
1_2	4	15.8	12.6	20.25
1_3	8	15.8	10.3	34.81
1_4	8	15.8	10.5	33.54
1_5	12	15.8	9.5	39.87
1_6	12	15.8	8.6	45.56

**Πίνακας 3-2: Μετρήσεις του παραμένουτος ωστενίτη για κάθε εύρος ποσοστού προέντασης**

Το ποσοστό μετασχηματισμού σε κάθε περίπτωση αντιστοιχεί ουσιαστικά στο ποσοστό μαρτενσίτη που δημιουργείται στο υλικό.

Από τη μελέτη των στοιχείων του πίνακα προκύπτει το συμπέρασμα ότι όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό προέντασης που έχει δεχτεί το δοκίμιο, τόσο αυξάνεται σε ποσοστό και η μαρτενσιτική φάση του υλικού λόγω του μετασχηματισμού που υφίσταται ο ωστενίτης κατά την πλαστική παραμόρφωση.

Ακόμα, φαίνεται ότι σε μικρά ποσοστά αρχικής παραμόρφωσης ο ρυθμός μετασχηματισμού του ωστενίτη είναι υψηλός ενώ όσο το ποσοστό προέντασης μεγαλώνει ο ρυθμός αυτός σταδιακά μειώνεται. Η συμπεριφορά αυτή εξηγείται από το γεγονός ότι το ποσοστό του παραμένουτος ωστενίτη που μεταβάλλεται σε μαρτενσίτη εξαρτάται από το μέγεθος των κόκκων του ωστενίτη. Αυτό που συμβαίνει στο υλικό στην πράξη είναι ότι αρχικά οι μεγαλύτεροι κόκκοι ωστενίτη μετασχηματίζονται πλήρως σε μαρτενσίτη ενώ στη συνέχεια οι μικρότεροι κόκκοι ωστενίτη καθυστερούν την κινητική του μηχανισμού του μετασχηματισμού, με αποτέλεσμα όλο και μικρότερο ποσοστό ωστενίτη να μπορεί να

μετατραπεί σε μαρτενσίτη. Η θεωρία αυτή επιβεβαιώνεται και μέσω των αποτελεσμάτων των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν σε χάλυβες TRIP με τα ίδια εύρη προεντάσεως μέσω της μεθόδου οριακής τιμής (threshold method).

<b>Προέντασης (%)</b>	<b>Ποσοστό παραμένοντος ωστενίτη (%)</b>	<b>Μέσο μέγεθος κόκκων (nm)</b>
0	15.8	340
4	13.7	305
8	12.1	135
12	7.1	134

**Πίνακας 3-3: Μετρήσεις του μέσου μεγέθους των κόκκων για κάθε εύρος ποσοστού προέντασης [18]**



## Κεφάλαιο 4: Πειραματική διαδικασία

### 4.1 Στόχοι

Η πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας έχει ως σκοπό τη διεξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με το υπό μελέτη υλικό που θα επεκτείνουν τη γνώση σχετικά με τη συμπεριφορά του κάτω από τις συνθήκες που επιβάλλονται κατά την πειραματική διαδικασία. Συγκεκριμένα, οι επιμέρους στόχοι της είναι οι εξής:

- Σύγκριση των μηχανικών ιδιοτήτων εφελκυσμού του χάλυβα TRIP 700 μετά από αρχικό ποσοστό παραμόρφωσης 4%, 8% και 12%
- Σύγκριση της αντίστασης σε θραύση του χάλυβα TRIP 700 μετά από αρχικό ποσοστό παραμόρφωσης 4%, 8% και 12%.
- Συσχέτιση της αντίστασης σε θραύση του υλικού με το αρχικό ποσοστό της μαρτενσιτικής φάσης

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής ακολουθήθηκε η πειραματική μεθοδολογία που συνοψίζεται στα παρακάτω βήματα:

- Βήμα 1: Κοπή πλακιδίων χάλυβα TRIP 700 τα οποία υποβλήθηκαν σε προένταση της τάξης του 4%, 8% και 12%
- Βήμα 2: Κοπή δοκιμών εφελκυσμού και C(T) βάσει των προδιαγραφών από τα προεντεταμένα πλακίδια
- Βήμα 3: Πραγματοποίηση δοκιμών εφελκυσμού σε δοκίμια με αρχική παραμόρφωση 4%, 8% και 12%
- Βήμα 4: Πραγματοποίηση δοκιμών θραύσης σε δοκίμια με αρχική παραμόρφωση 0%, 4%, 8% και 12%
- Βήμα 5: Διεξαγωγή συμπερασμάτων από τα αποτελέσματα των πειραμάτων

## 4.2 Πειραματική διάταξη

### 4.2.1 Μηχανές εφελκυσμού

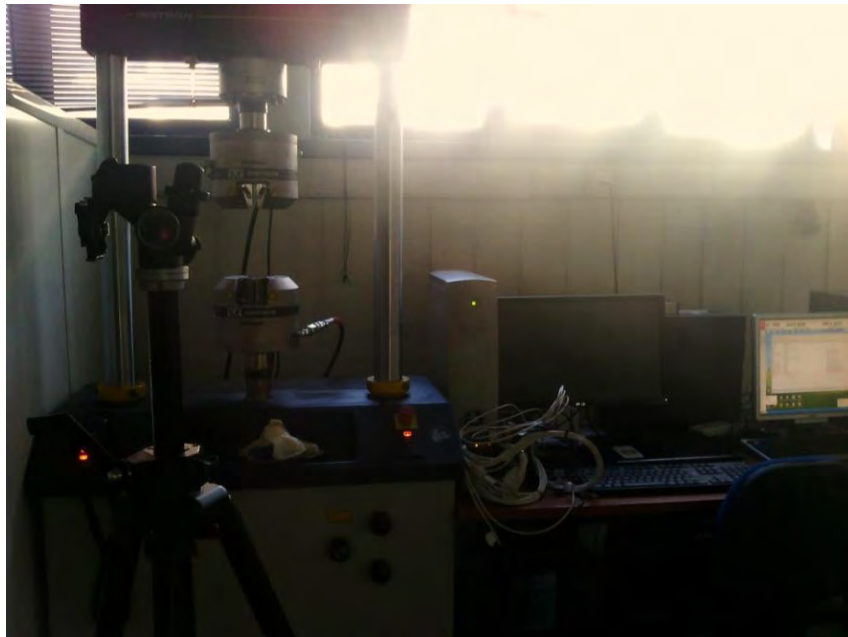
Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Μηχανικής Αντοχής των Υλικών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Τα μηχανήματα που χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα μονοαξονικού εφελκυσμού είναι η **μηχανή εφελκυσμού Instron 8801** και **μηχανή εφελκυσμού MTS 810**.

Η κάθε μία πειραματική διάταξη αποτελείται από τρία κύρια τμήματα: την υδραυλική αντλία λαδιού, το πλαίσιο φόρτισης με το κινούμενο έμβολο και τις αρπάγες συγκράτησης των δοκιμίων και την ηλεκτρονική μονάδα.

Και στις δύο περιπτώσεις οι μηχανές ουσιαστικά αποτελούν ένα σύστημα ελέγχου μηχανικών δοκιμών κλειστού βρόγχου όπου οι εντολές για κίνηση του εμβόλου δίνονται από τον χρήστη και μεταφέρονται σαν ηλεκτρικό σήμα από την κονσόλα στην αντλία λαδιού η οποία κινεί το έμβολο στο πλαίσιο φόρτισης.

Και τα δύο συστήματα είναι ικανά να καλύψουν τις ανάγκες τόσο για στατικά όσο και για δυναμικά πειράματα ενώ η κάθε μία διαθέτει κατάλληλο λογισμικό για τον έλεγχο και την καταγραφή των πειραμάτων σε ηλεκτρονική μορφή με μεγάλη ακρίβεια.

Η χρήση των δύο συστημάτων και των επιμέρους εργαλείων τους δεν την παραγωγή αξιόπιστων και συγκρίσιμων αποτελεσμάτων.



*Εικόνα 4-1: Διάταξη της μηχανής εφελκυσμού Instron του Εργαστηρίου Μηχανικής και Αντοχής των Υλικών*



*Εικόνα 4-2: Διάταξη της μηχανής εφελκυσμού MTS του Εργαστηρίου Μηχανικής και Αντοχής των Υλικών*

#### **4.2.2 Οπτικό σύστημα καταγραφής παραμορφώσεων της Limes - RTSS Videoextensometer**

Για την καταγραφή των δεδομένων που προέκυψαν από τα πειράματα της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε το **οπτικό σύστημα καταγραφής παραμορφώσεων της Limes - RTSS Videoextensometer**.

Το σύστημα αποτελείται από μία κάμερα υψηλής ευκρίνειας, ειδικό φωτισμό led καθώς και λογισμικό το οποίο εγκαθίσταται στον υπολογιστή και συνδέεται με το λογισμικό της μηχανής εφελκυσμού.

Πριν την εκκίνηση των πειραμάτων, πάνω στα δοκίμια κολλούνται δύο αυτοκόλλητα δύο χρωμάτων, μαύρου και λευκού. Τα δύο αυτά αυτοκόλλητα καθορίζουν τα δύο σημεία με βάση τα οποία γίνονται οι μετέπειτα υπολογισμοί. Η αρχική απόσταση των σημείων είναι γνωστή και εισάγεται αυτόματα στο σύστημα μετά από την κατάλληλη βαθμονόμηση.



*Εικόνα 4-3: Απόσταση μεταξύ δύο σημείων όπως αναγνωρίζονται μέσω του λογισμικού του οπτικού συστήματος*

Όταν το δοκίμιο τοποθετηθεί στη μηχανή εφελκυσμού γίνεται προσεκτική τοποθέτηση της κάμερας και του φωτισμού προκειμένου να γίνεται εστίαση της εικόνας στα δύο σημεία που έχουν μαρκαριστεί και να μπορούν να αναγνωριστούν από το λογισμικό. Στη συνέχεια το πρόγραμμα παρακολουθεί την πορεία των δύο αυτών σημείων και μετράει τη μετατροπή της μεταξύ τους απόστασης καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος και τη μετατρέπει σε ονομαστική παραμόρφωση του δοκιμίου. Η μετατροπή αυτή γίνεται διαιρώντας τη μεταβολή της μεταξύ τους απόστασης με την αρχική απόσταση η οποία έχει δηλωθεί στο σύστημα.

Καθώς το λογισμικό του συστήματος έχει συνδεθεί με το λογισμικό της μηχανής εφελκυσμού κάθε τιμή της παραμόρφωσης αντιστοιχίζεται στο φορτίο που ασκείται εκείνη την στιγμή στο δοκίμιο, επομένως είναι δυνατός ο έλεγχος για την επίτευξη των επιθυμητών τιμών προέντασης, ο σχεδιασμός του διαγράμματος τάσης-παραμόρφωσης καθώς και η χάραξη του διαγράμματος φορτίου- απόστασης μεταξύ των δύο σημείων, επομένως το σύστημα καλύπτει όλες τις ανάγκες που παρουσιάζονται κατά τη διεξαγωγή της παρούσας εργασίας.

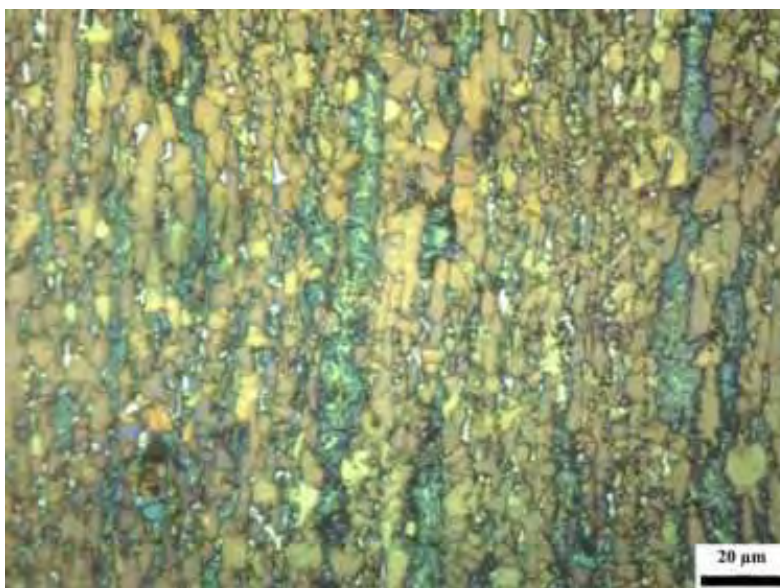
### 4.3 Υλικό δοκιμών

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση των πειραμάτων ήταν ελάσματα του **χάλυβα TRIP 700** με **αρχικό ποσοστό παραμένουστος ωστενίτη 15.8%** και ονομαστικό πάχους 1.4 mm. Τα κύρια κραματικά στοιχεία του χάλυβα φαίνονται στον πίνακα:

Άνθρακας C	Αλουμίνιο Al	Μαγγάνιο Mn	Πυρίτιο Si	Φώσφορος P
0.202	1.07	1.99	0.348	0.009

*Πίνακας 4-1: Κύρια κραματικά στοιχεία χάλυβα TRIP 700 (κατά βάρος %)*

Η μικροδομή του χάλυβα TRIP 700, ο οποίος έχει υποστεί έλαση εν θερμώ, φαίνεται στην εικόνα 4-5. Ο ωστενίτης είναι η φάση που διακρίνεται με λευκό χρώμα, ο φερρίτης με καφέ - κίτρινο ενώ ο μπαινίτης έχει πάρει αποχρώσεις του πράσινου παρά του μαύρου όπως συνηθίζεται.



*Εικόνα 4-4: Μικροδομή χάλυβα TRIP 700 Hot Rolled (x1000) [19]*

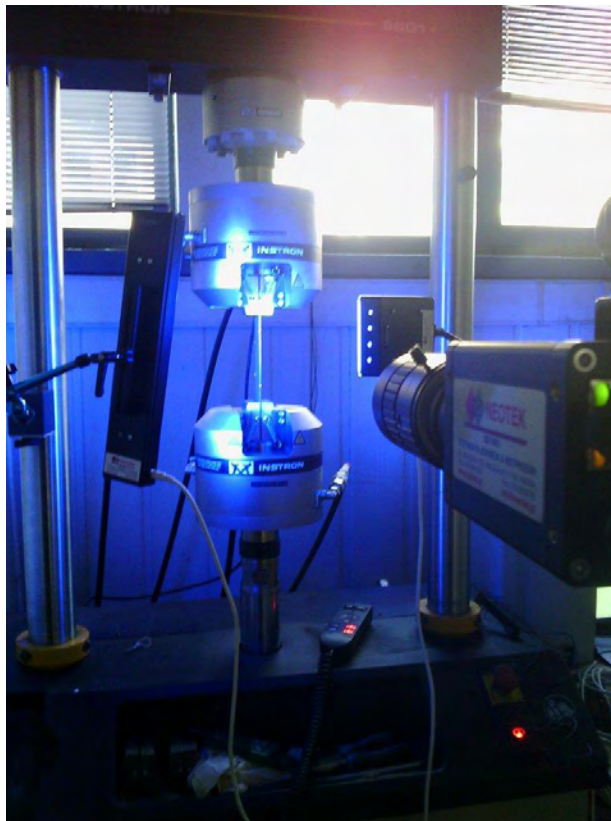
Ο χάλυβας αυτός ανήκει στην κατηγορία των **Προηγμένων Χάλυβων Υψηλής Αντοχής (AHSS)**. Παρουσιάζει υψηλό όριο διαρροής ενώ χάρη στο φαινόμενο TRIP χρησιμοποιείται ευρέως στην αυτοκινητοβιομηχανία.

#### 4.4 Δοκιμές μονοαξονικού εφελκυσμού

Οι δοκιμές εφελκυσμού πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με την προδιαγραφή **ASTM E8M-01** [26] στο εργαστήριο Μηχανικής και Αντοχής Υλικών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Πραγματοποιήθηκαν δύο σειρές πειραμάτων εφελκυσμού τα οποία ήταν τα εξής:

- Πειράματα αρχικής προέντασης σε ελάσματα του υλικού
- Πειράματα μονοαξονικού εφελκυσμού για σχεδιασμό των καμπυλών σ-ε του υλικού για κάθε ένα από τα εύρη αρχικής παραμόρφωσης

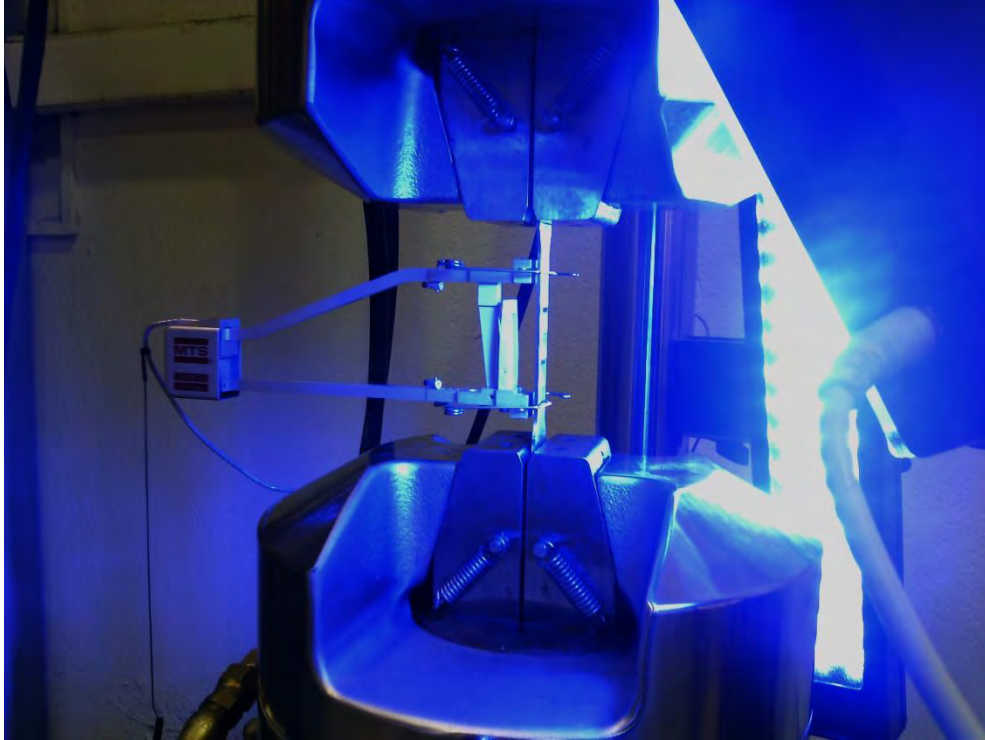
Σκοπός της πρώτης σειράς πειραμάτων ήταν να προσδοθεί μία αρχική προένταση σε ένα αριθμό δοκιμίων προκειμένου να μπορούν να ληφθούν αποτελέσματα της εξέλιξης ρωγμής για κάθε ένα από αυτά τα ποσοστά προέντασης και στη συνέχεια να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η φόρτιση και η αποφόρτιση πλακών του ίδιου χάλυβα ώστε η κάθε μία να παραλάβει ένα προκαθορισμένο ποσοστό πλαστικής παραμόρφωσης. Συγκεκριμένα, έγιναν συνολικά 9 πειράματα, κατά τα οποία προσδόθηκε **ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης 4%, 8% και 12%** για 3 ελάσματα σε κάθε περίπτωση αντίστοιχα.



*Εικόνα 4-5: Διάταξη πρώτης σειράς πειραμάτων με τη χρήση του οπτικού συστήματος παραμορφώσεων*



Σκοπός της δεύτερης σειράς πειραμάτων ήταν ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων εφελκυσμού καθώς και χάραξη των καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης για κάθε ένα από τα ποσοστά προέντασης τα οποία δόθηκαν στο υλικό των δοκιμών. Συνολικά έγιναν 6 πειράματα, για ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης 4%, 8% και 12% αντίστοιχα.



*Εικόνα 4-6: Διάταξη δεύτερης σειράς πειραμάτων (μονοαξονικού εφελκυσμού)*

Όλα τα δοκίμια κόπηκαν με laser ενώ η κοπή έγινε παράλληλα με τη διεύθυνση της έλασης, καθώς κατά τη διεύθυνση αυτή ο χάλυβας έχει αποκτήσει μεγαλύτερη αντοχή και καλύτερες ιδιότητες. Ακόμα πριν την διαδικασία των πειραμάτων προκειμένου να καθαριστούν ακαθαρσίες και υπολείμματα κατεργασιών από τις επιφάνειες έγινε χρήση λειαντικών χαρτιών από καρβίδιο πυριτίου (SiC).

Όλες οι δοκιμές έγιναν με ελεγχόμενη και σταθερή μετατόπιση του εμβόλου της μηχανής με ταχύτητα 0.5 mm/min.

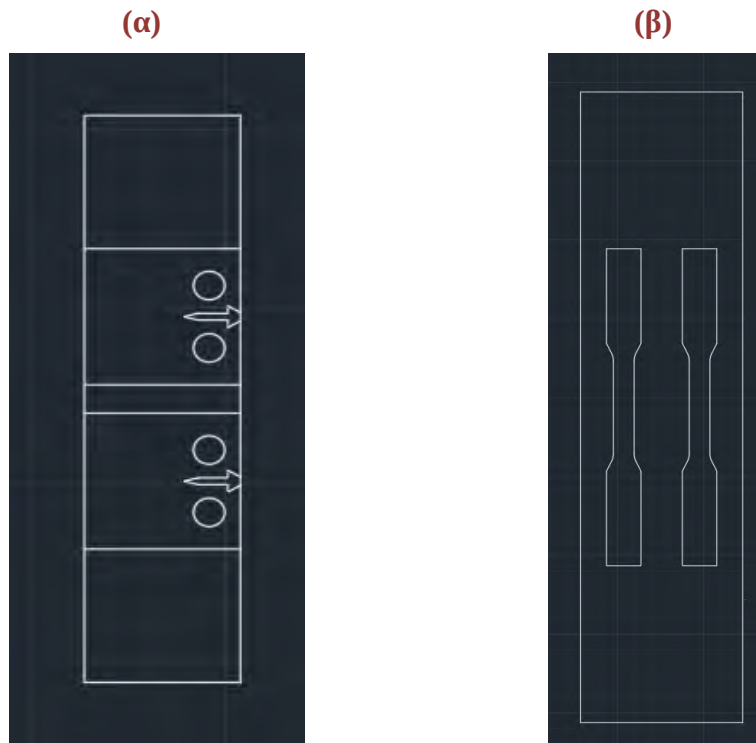
#### 4.4.1 Πρώτη σειρά πειραμάτων

Αυτή η σειρά πειραμάτων δεν αποτέλεσε πηγή αποτελεσμάτων καθώς ουσιαστικά πραγματοποιήθηκε αποτελώντας ένα πρώτο στάδιο επεξεργασίας του χάλυβα TRIP 700 προκειμένου στη συνέχεια να μπορέσουν να διεξαχθούν τα υπόλοιπα πειράματα και να επιτευχθούν οι στόχοι της εργασίας.

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στη μηχανή κόπωσης Instron 8801 100 kN και η καταγραφή δεδομένων έγινε με την χρήση του οπτικού συστήματος καταγραφής παραμορφώσεων της Limes.

Οι πλάκες χάλυβα TRIP 700 που χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα προέντασης ήταν διαστάσεων 200X52 mm και αρχικού πάχους 1.4mm. Το μήκος των πλακών επιλέχθηκε έτσι ώστε από κάθε μία πλάκα να μπορούν στην συνέχεια να κοπούν δύο δοκίμια C(T) ή δύο δοκίμια εφελκυσμού αντίστοιχα, τα οποία είναι απαραίτητα για την διεξαγωγή των υπόλοιπων πειραμάτων της παρούσας εργασίας.

Το πλάτος των ελασμάτων επιλέχθηκε με βάση το πλάτος των αρπάγων της μηχανής εφελκυσμού, το οποίο είναι ίσο με 52mm, ώστε να εξασφαλίζεται ομοιόμορφη κατανομή παραμορφώσεων στην πλάκα.



Εικόνα 4-7: Πλάκα του χάλυβα TRIP και τοποθέτηση (α) των δοκιμίων C(T) και (β) των δοκιμίων εφελκυσμού σε σχέση με αυτή

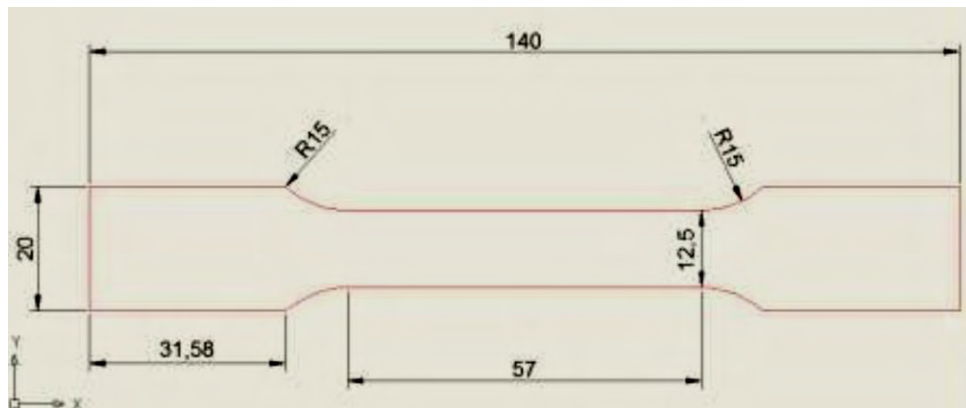


#### 4.4.2 Δεύτερη σειρά πειραμάτων

Τα πειράματα μονοαξονικού εφελκυσμού πραγματοποιήθηκαν στη μηχανή κόπωσης MTS810 100kN ενώ η καταγραφή των δεδομένων έγινε με δύο διαφορετικούς τρόπους. Η πρώτη μέθοδος καταγραφής πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του ειδικού μετρητικού οργάνου MTS axial extensometer μήκους 50mm ενώ η δεύτερη μέθοδος καταγραφής, η οποία πραγματοποιήθηκε παράλληλα με την πρώτη κατά την διεξαγωγή ενός αριθμού πειραμάτων, έγινε με την χρήση του οπτικού συστήματος της Limes.

Οι δύο αυτοί μέθοδοι χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να μπορούν να συγκριθούν οι μετρήσεις των δύο διαφορετικών συστημάτων και να ληφθούν υπόψη τυχόν αποκλίσεις κατά τη διεξαγωγή μελλοντικών ερευνών.

Οι διαστάσεις των δοκιμίων που μελετήθηκαν (εικόνα 4-9) καθώς και οι πειραματικές συνθήκες επιλέχθηκαν με βάση την προδιαγραφή ASTM E8M. [20]



Εικόνα 4-8: Διαστάσεις δοκιμίων εφελκυσμού

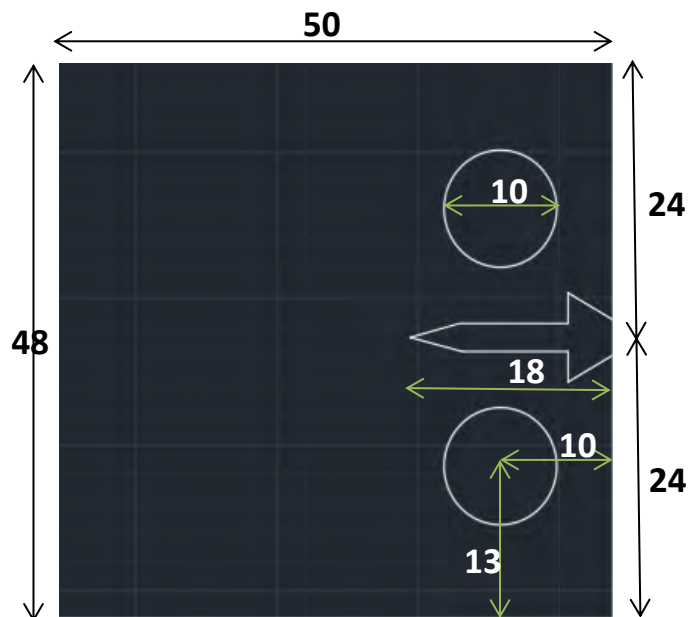
## 4.5 Δοκιμές προσδιορισμού της αντίστασης σε θραύση

### 4.5.1 Πειραματικές συνθήκες

Οι δοκιμές εξέλιξης ρωγμής σε κόπωση πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με την *προδιαγραφή ASTM E 561 –98 [5]* στο εργαστήριο Μηχανικής και Αντοχής Υλικών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στη μηχανή κόπωσης MTS 810 100 kN. Συνολικά έγιναν 8 δοκιμές τόσο σε δοκίμια από το αρχικό έλασμα όσο και σε ελάσματα που κόπηκαν από τις πλάκες που είχαν υποστεί αρχική παραμόρφωση της τάξης του 4, 8 και 12% όπως ορίστηκε στο κεφάλαιο 4.4. Η κοπή των δοκιμίων έγινε με ηλεκτροδιάβρωση (Electrical Discharge Machine) σε μηχανουργείο που συνεργάζεται με το πανεπιστήμιο. Η διαδικασία αν και είναι μικρής ταχύτητας, επιτρέπει την κοπή μεταλλικών αντικειμένων με ακρίβεια που είναι αδύνατον να κατεργασθούν με άλλους τρόπους λόγω της σκληρότητάς τους ή λόγω του μικρού μεγέθους τους, όπως στην προκειμένη περίπτωση. Η μέθοδος επιτρέπει, επίσης, τη δημιουργία ασυνήθιστων σχημάτων και εγκοπών, όπως για παράδειγμα την κατασκευή ρωγμών σε δοκίμια κόπωσης, ενώ από αυτή προκύπτουν άριστα αποτελέσματα σε ότι αφορά την ποιότητα των επιφανειών κοπής και την ακρίβεια των διαστάσεων. [21]

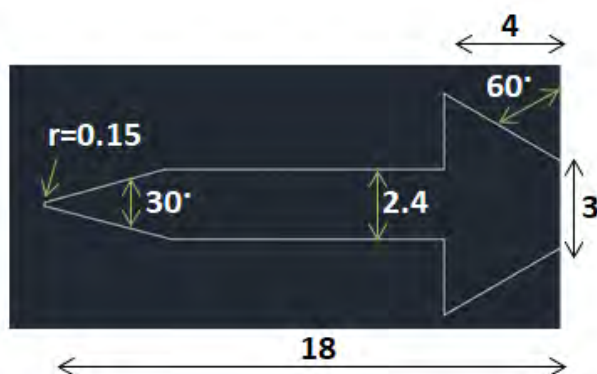
Η κοπή έγινε έτσι ώστε η διάδοση της ρωγμής να γίνεται κάθετα στην διεύθυνση έλασης του υλικού (εικόνα 4-12) διότι από τα πειράματα εφελκυσμού έχουν μελετηθεί οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού σε αυτή την διεύθυνση.

Οι διαστάσεις του δοκιμίου επιλέχθηκαν με βάση την προδιαγραφή λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς που αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 4.4.1 προκειμένου να μπορούν τα δοκίμια με αρχική προένταση να κοπούν από τις πλάκες του χάλυβα TRIP 700 σε ίδιες διαστάσεις (εικόνα 4-10) ανεξάρτητα από το ποσοστό παραμόρφωσης.



Εικόνα 4-9: Σχέδιο του δοκιμίου C(T) με τις βασικές τους διαστάσεις

Το συνολικό μήκος της εγκοπής, επιλέχθηκε να είναι  $a_{n,total} = 18\text{mm}$  ενώ το μέρος του μήκους αυτού που αντιστοιχεί στο αρχικό μήκος ρωγμής είναι ίσο με  $a_n = 8\text{mm}$  (το μήκος της ρωγμής υπολογίζεται από το κέντρο των οπών μέχρι την αιχμή της εγκοπής). Η τιμή αυτή είναι η μικρότερη που μπορεί να ληφθεί αφού σύμφωνα με την προδιαγραφή θα πρέπει  $a_n \geq 0.2W$  όπου  $W = 40\text{mm}$ . Η επιλογή της μικρότερης δυνατής τιμής έγινε καθώς δεν είναι επιθυμητό η αρχική ρωγμή να πλησιάζει πολύ το πλάτος  $W$  του δοκιμίου, έτσι ώστε να υπάρχει μεγάλο περιθώριο μετρήσεων μέχρι τη θραύση του δοκιμίου και να είναι αξιόπιστα τα αποτελέσματα.



Εικόνα 4-10: Γεωμετρία στην άκρη της εγκοπής

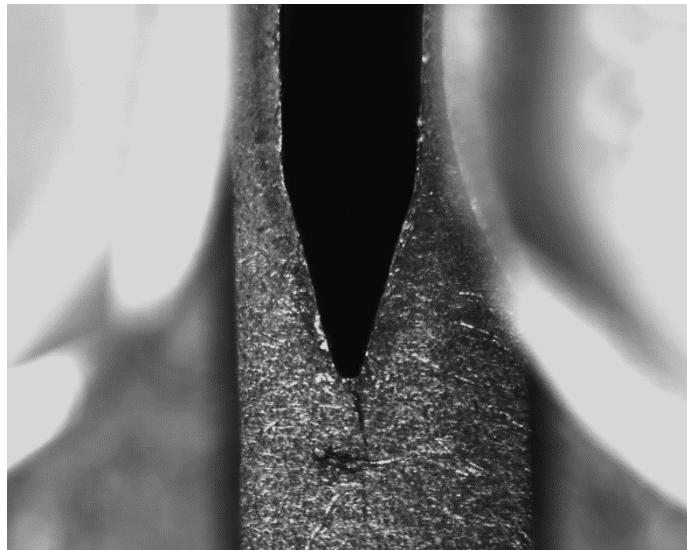
Πριν την διεξαγωγή των πειραμάτων εξέλιξης ρωγμής πραγματοποιήθηκε η δημιουργία μίας αρχικής ρηγμάτωσης του δοκιμίου (**precrack**), διαδικασία η οποία επίσης καθορίζεται από την προδιαγραφή ASTM E561 καθώς και από την προδιαγραφή ASTM E647-00. [22]

Προκειμένου να δημιουργηθεί η αρχική αυτή ρωγμή πραγματοποιήθηκαν δοκιμές κόπωσης σε θερμοκρασία δωματίου με σταθερό λόγο τάσεων  $R=0.1$  και συχνότητα 5Hz σε ένα μικρό εύρος φορτίων το οποίο να ικανοποιεί τη συνθήκη που ορίζει η προδιαγραφή [5]:

$$K_{max}/E= 0.00013\sqrt{m} \quad (4.1)$$

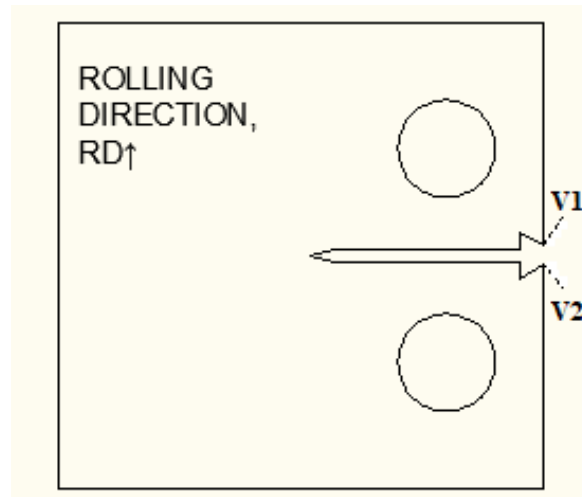
όπου  $K_{max}$  είναι η μέγιστη τιμή του συντελεστή έντασης τάσεως υπολογισμένη για μήκος ρήγματος  $a_n$  και  $E$  το μέτρο ελαστικότητας του υλικού.

Η παρακολούθηση του ρήγματος έγινε με το οπτικό σύστημα καταγραφής παραμορφώσεων της LIMESS με τη χρήση ειδικού φακού και ενός επιπλέον zoom tube μήκους 40mm, με σκοπό την όσο το δυνατό μεγαλύτερη μεγέθυνση της υπό μελέτης περιοχής προκειμένου να είναι ορατή η άκρη του ρήγματος. Το μήκος της αρχικής αυτής ρηγματώσης επιλέχθηκε να είναι ίσο με περίπου 2mm για όλα τα δοκίμια.



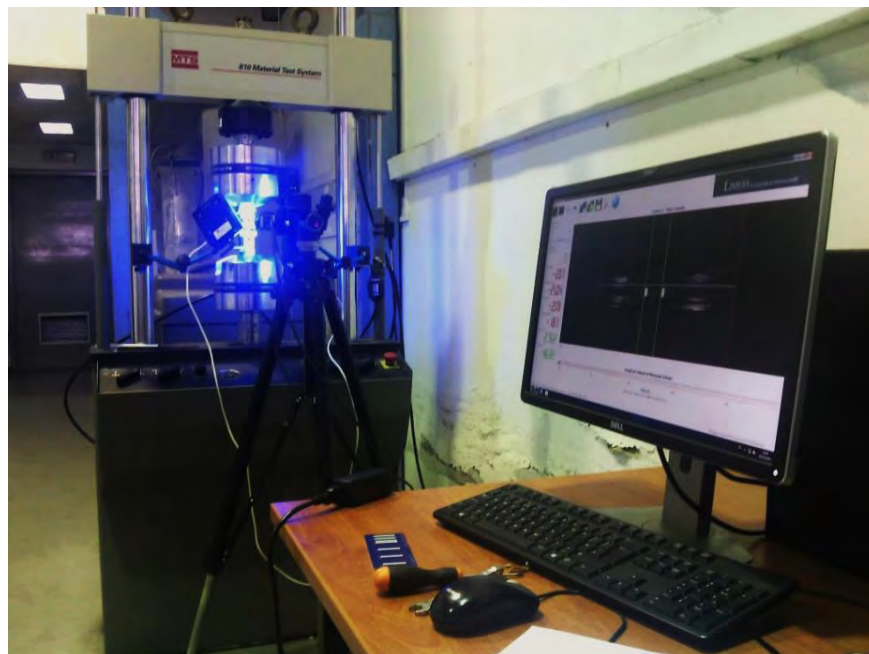
*Εικόνα 4-12: Φωτογραφία της αρχικής ρηγματώσης μέσω του οπτικού συστήματος καταγραφής*

Στη συνέχεια για τη διεξαγωγή των πειραμάτων δυσθραυστότητας οι μετρήσεις των παραμορφώσεων έγινε με τη χρήση του οπτικού συστήματος της Limesse με το μαρκάρισμα των σημείων V1 και V2 όπως φαίνεται στην εικόνα 4-12.



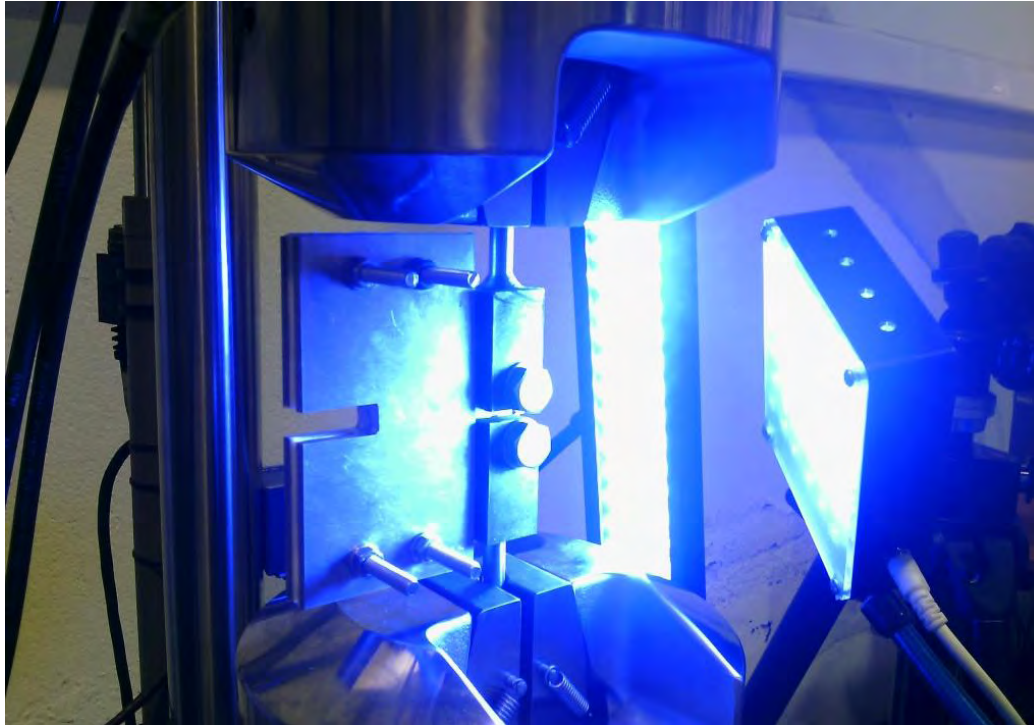
*Εικόνα 4-12: Σημεία V1 και V2 για μέτρηση της εξέλιξης ρωγμής*

Τα πειράματα από τα οποία προκύπτει η καμπύλη δυσθραυστότητας είναι ουσιαστικά πειράματα μονοαξονικού εφελκυσμού με πολύ αργό ρυθμό μετατόπισης του εμβόλου προκειμένου να προλαβαίνει το ρήγμα να σταθεροποιηθεί για κάθε τιμή του φορτίου που καταγράφεται. Τα πειράματα μπορούν να διεξαχθούν είτε με σταθερή μετατόπιση του εμβόλου (displacement control) είτε με σταθερή τιμή αύξησης του φορτίου (load control), ωστόσο επιλέχθηκε η πρώτη μέθοδος καθώς τείνει να είναι πιο σταθερή και να μην προκαλεί σημεία αστάθειας όπως προκύπτει από την δεύτερη μέθοδο. [4] Με βάση αυτά, η ταχύτητα μετατόπισης του εμβόλου επιλέχθηκε να είναι ίση με 0.05mm/min.



*Εικόνα 4-13: Πειραματική διάταξη οπτικού συστήματος κατά τα πειράματα δυσθραυστότητας*

Εξαιτίας του μικρού πάχους του δοκιμίου κρίθηκε αναγκαία η χρήση ειδικής αντιλυσισμικής συσκευής προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι η φόρτιση που θα παραλάβει το δοκίμιο θα είναι τύπου I και δεν θα υπάρξουν παραμορφώσεις εκτός επιπέδου που θα επηρεάσουν την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Η συσκευή αυτή αποτελείται από δύο άκαμπτες μεταλλικές πλάκες οι οποίες τοποθετούνται εκατέρωθεν των επιπέδων του δοκιμίου καθώς και από δύο εσωτερικές στρώσεις τεφλόν προκειμένου να μειωθεί η επίδραση της τριβής μεταξύ των μεταλλικών επιφανειών.



*Εικόνα 4-14: Πειραματική διάταξη δοκιμίου κατά τα πειράματα δυσθραυστότητας*

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και τη μεταβολή του φορτίου και του ανοίγματος του ρήγματος V που καταγράφηκαν μέσω του οπτικού συστήματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ενδοτικότητας που αναλύεται στις προδιαγραφές [5, 22]. Ωστόσο καθώς οι διαστάσεις του δοκιμίου είναι πολύ μικρές η συνθήκη μικρής πλαστικότητας ικανοποιείται μόνο για ένα μικρό μέρος του πειράματος και επομένως δεν μπορεί να υπολογιστεί η κρίσιμη τιμή  $K_{IC}$  του υλικού.

Για το λόγο αυτό προσδιορίστηκαν οι καμπύλες Φορτίου-Ανοίγματος της ρωγμής και προσδιορίστηκαν οι συμπεριφορές του υλικού με διαφορετικό εύρος αρχικής προέντασης και κατ' επέκταση με διαφορετικό ποσοστό μαρτενσίτη στην μικροδομή του.





*Εικόνα 4-15: Άνοιγμα των χειλέων της ρωγμής σε μεγέθυνση*

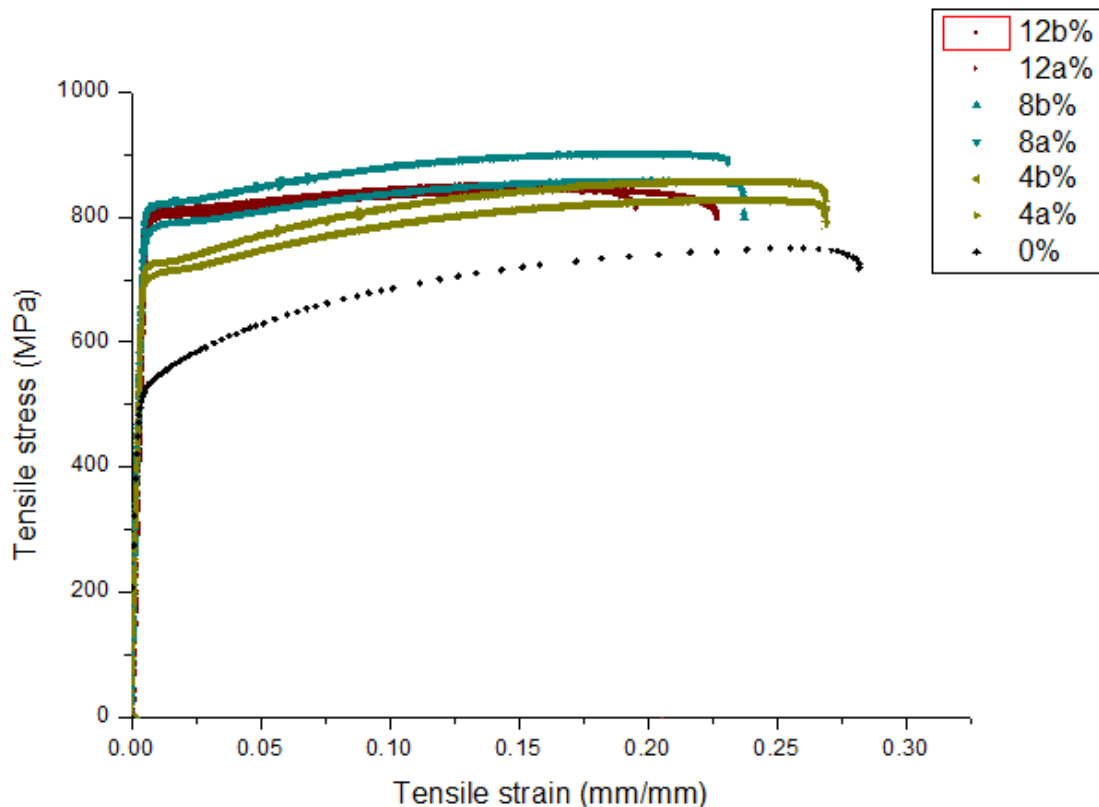
## Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα

### 5.1 Αποτελέσματα πειραμάτων μονοαξονικού εφελκυσμού

Τα πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη και βασική κατηγορία αφορά τη σύγκριση των καμπυλών εφελκυσμού μετά από προένταση με διαφορετικό εύρος αρχικής παραμόρφωσης που μελετήθηκαν στα πλαίσια της εργασίας. Η δεύτερη κατηγορία πειραμάτων αφορά την σύγκριση των δύο διαφορετικών μετρητικών συστημάτων που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή των πειραμάτων ώστε να αξιολογηθεί η αξιοπιστία και η συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων.

#### 5.1.1 Σύγκριση καμπυλών εφελκυσμού για τα διάφορα εύρη προέντασης

Οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης που προέκυψαν από τα πειράματα μονοαξονικού εφελκυσμού για τα υλικά με ποσοστά προέντασης 4%, 8% και 12% παρουσιάζονται στο σχήμα 5-1 ενώ οι ιδιότητες εφελκυσμού τους συνοψίζονται στον πίνακα 5-1.



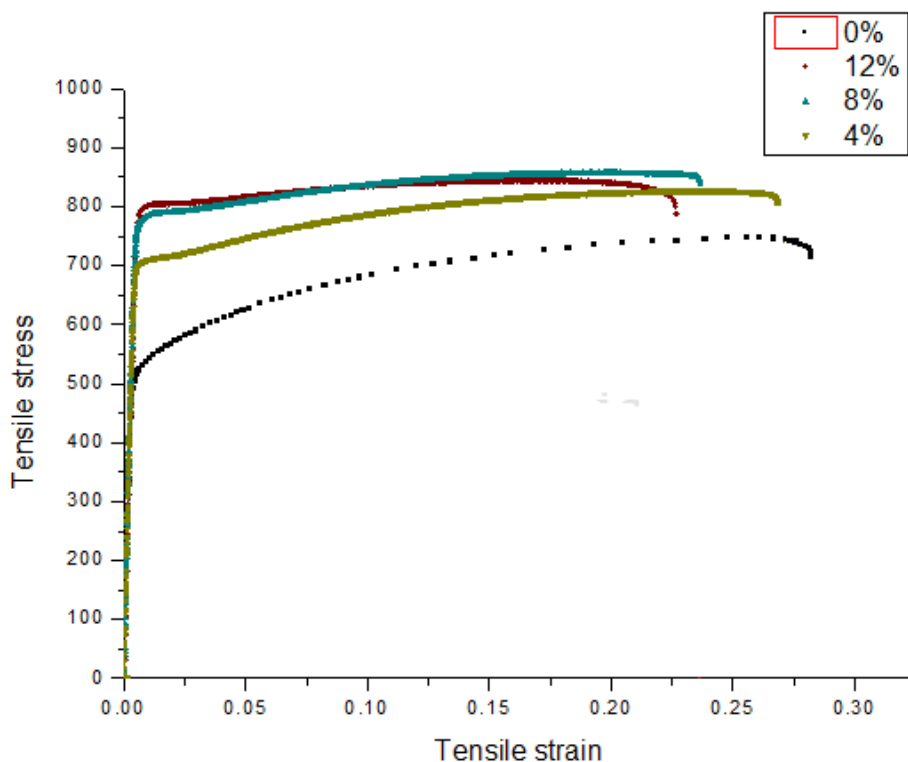
Σχήμα 5-1: Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης χάλυβα TRIP 700 για διάφορα ποσοστά προέντασης



Ποσοστό προέντασης	$\sigma_{y0.2}$ (MPa)	$\sigma_{uts}$ (MPa)	$A_{neck}$ (%)	$A_{50}$ (%)	Εκθέτης εργοσκήρυνσης $n$
0%	515	749	25	28	0.17
4%	714.3	856.62	23.51	26.86	0.155
	696.7	826.54	23.76	26.85	
8%	814.4	903.82	19.25	23.08	0.13
	768.32	856.1	20.36	23.71	
12%	801.47	851.37	15.37	19.54	0.105
	792.7	843.44	17.8	22.68	

*Πίνακας 5-1: Ιδιότητες εφελκυσμού του χάλυβα TRIP 700 για διαφορετικά ποσοστά προέντασης*

Για να γίνει πιο σαφής η μετατροπή της συμπεριφοράς του υλικού, στο σχήμα 5-2 γίνεται σύγκριση μεταξύ μίας καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης για κάθε ένα από τα ποσοστά προέντασης με την αντίστοιχη καμπύλη του υλικού χωρίς προένταση.



*Σχήμα 5-2: Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης χάλυβα TRIP 700 για κάθε ένα από τα ποσοστά προέντασης*

Όπως γίνεται εμφανές από τα διαγράμματα αλλά και από τα στοιχεία του πίνακα, το **όριο διαρροής  $\sigma_y$**  του υλικού αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού αρχικής παραμόρφωσης. Ωστόσο, το ποσοστό αύξησης συνεχώς μικραίνει με την αύξηση της προέντασης, με το όριο διαρροής των υλικών με ποσοστό 8% και 12% σχεδόν να ταυτίζονται, αφού κατά μέσο όρο η ποσοστιαία τους απόκλιση είναι της τάξης του 0.005%.

Η αύξηση αυτή του ορίου διαρροής των υλικών εξηγείται από την πλαστική παραμόρφωση που έχει ήδη προηγηθεί στο υλικό κατά την προένταση του, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ορίου διαρροής λόγω της αύξησης της πυκνότητας των κινητών γραμμοαταξιών που επιδρούν σε επίπεδα ολίσθησης (εργοσκλήρυνση), αλλά και την ταυτόχρονη μείωση της παραμόρφωσης θραύσης του. Επίσης επίδραση έχει η αύξηση του ποσοστού της μαρτενσιτικής φάσης που σε ποσοστά 4%, 8% και 12% έχει αντίστοιχα αυξηθεί στην μικροδομή κατά 18.99%, 34.175% και 42.715%. Η μαρτενσιτική φάση ως πιο σκληρή σε σχέση με την ωστενιτική προσδίδει αύξηση της αντοχής του υλικού. Τα ποσοστά με τα οποία συνεισφέρουν στην αύξηση του ορίου διαρροής το φαινόμενο της εργοσκλήρυνσης και το φαινόμενο του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού δεν μπορεί στην παρούσα φάση να ποσοτικοποιηθεί και χρειάζεται περαιτέρω έρευνα για να διαπιστωθεί. Επίσης στο ένα από τα δύο πειράματα σε υλικό με ποσοστό προέντασης 8% το όριο διαρροής ξεπέρασε αυτό των υλικών με ποσοστό προέντασης 12%, γεγονός που μπορεί να υποδηλώνει ότι τόσο μεγάλα ποσοστά προέντασης η συνεισφορά της εργοσκλήρυνσης και του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού αρχίζει να μην είναι σημαντική στη συμπεριφορά αντοχής του υλικού.

Το **όριο θραύσης  $\sigma_{uts}$**  για ποσοστά προέντασης 4% και 8% αυξάνεται σε σχέση με το υλικό αναφοράς (χωρίς προένταση), αλλά για παραμόρφωση της τάξης του 12% τελικά μειώνεται. Ως αποτέλεσμα, τα δοκίμια με αρχική παραμόρφωση 12% αστόχησαν σε μικρότερη τάση από τα δοκίμια με αρχική παραμόρφωση 8%, χωρίς ωστόσο τα όρια θραύσης να έχουν μεγάλη διαφορά όπως φαίνεται στον πίνακα 5-1.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει επιπλέον με την αύξηση της σκληρής μαρτενσιτικής φάσης η οποία χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη αντοχή σε σχέση με τις άλλες μαλακότερες φάσεις του υλικού. Ο μετασχηματισμός του ωστενίτη σε μαρτενσίτη δεν συμβαίνει μόνο κατά τη διαδικασία προέντασης, αλλά και κατά τη διαδικασία του μονοαξονικού εφελκυσμού μέχρι και τη θραύση του υλικού. Ωστόσο, εκτός από μεγαλύτερο ποσοστό μαρτενσίτη που αυξάνει την αντοχή του υλικού, η αύξηση του ποσοστού προέντασης έχει ως απόρροια και τη μείωση του μεγέθους των κόκκων του παραμένου ωστενίτη. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα την καθυστέρηση δημιουργίας μαρτενσίτη για τα υλικά με μεγαλύτερα ποσοστά προέντασης, δυσχεραίνοντας έτσι την περαιτέρω αύξηση της αντοχής του υλικού. Η παράλληλη επίδραση των δύο αυτών παραγόντων μπορεί να είναι και η αιτία που στα υλικά με

ποσοστό προέντασης 8% και 12%, όπου το μέγεθος των κόκκων έχει μεγαλύτερη επίδραση από ότι στα υλικά με μικρότερο ποσοστό προέντασης, το όριο θραύσης έχει καθοδική πορεία αντίθετα με την ανοδική που αναμενόταν.

Ακόμα, τόσο η **συνολική παραμόρφωση** που έχει δεχτεί το υλικό κατά τη δημιουργία λαιμού όσο και η **παραμόρφωση θραύσεως** των υλικών μικραίνουν σε τιμή με την αύξηση της προέντασης. Πιο συγκεκριμένα, ενώ τα ποσοστά παραμόρφωσης και θραύσεως του υλικού αναφοράς είναι ίσα με 25% και 28%, για ποσοστό προέντασης 12% οι τιμές αυτές μειώθηκαν κατά 8.415 και 6.89 ποσοστιαίες μονάδες κατά μέσο όρο αντίστοιχα, οι οποίες μεταβολές είναι οι μεγαλύτερες που σημειώθηκαν κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων.

Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι οι σκληρότερες φάσεις του χάλυβα TRIP έχουν υψηλό ρυθμό εργοσκληρυνσης και αντοχή και χαμηλή παραμορφωσιμότητα ενώ αντίθετα η μαλακότερη φερριτική φάση έχει χαμηλό δείκτη εργοσκληρυνσης και αντοχή ενώ ταυτόχρονα υψηλή παραμορφωσιμότητα. Κατά την επιβολή τάσεων στο υλικό, ο μηχανισμός της πλαστικής παραμόρφωσης πρώτα επικεντρώνεται στην πιο μαλακή φάση η οποία εργοσκληρύνεται ενώ τελικά παραμορφώνονται πλαστικά και οι σκληρότερες φάσεις. Επομένως, καθώς όσο αυξάνεται το ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης του υλικού τόσο αυξάνεται και το ποσοστό των σκληρότερων φάσεων, είναι λογικό να γίνεται συνεχώς δυσκολότερη η πλαστική παραμόρφωση του υλικού αφού συμμετέχει μεγαλύτερο ποσοστό μιας φάσης με χαμηλή παραμορφωσιμότητα.

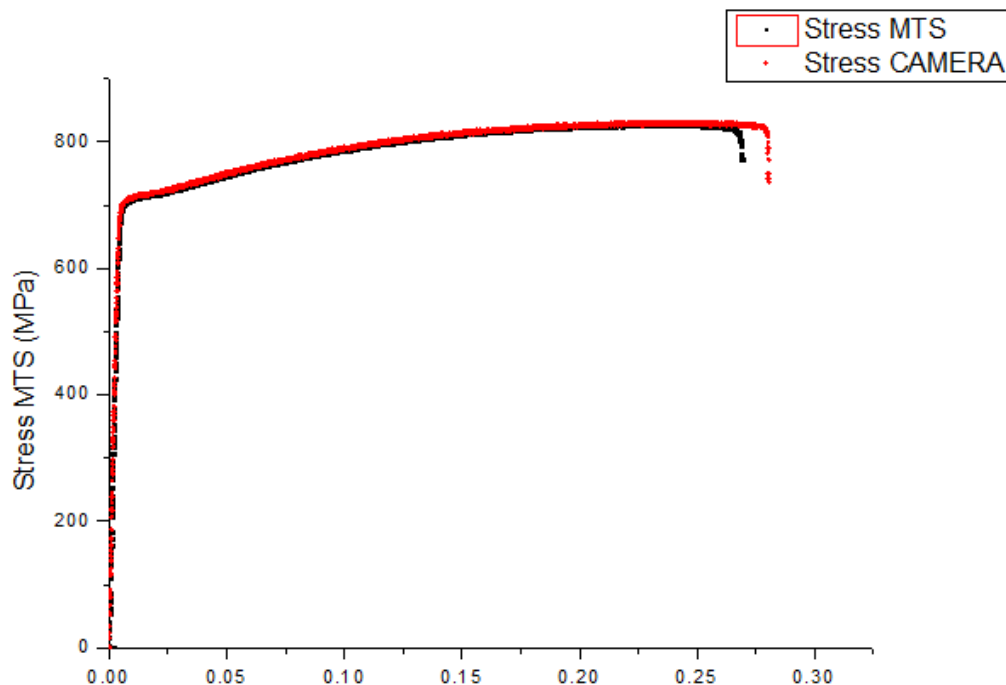
Τέλος, ο **συντελεστής εργοσκληρυνσης  $n$**  μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού προέντασης του υλικού κατά την διάρκεια της πλαστικής παραμόρφωσής του. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ένα ποσοστό της ικανότητας εργοσκληρυνσης του υλικού χρησιμοποιήθηκε κατά την διαδικασία προεργασίας του υλικού, προκειμένου το υλικό να φτάσει στο επιθυμητό ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης.

Συνοψίζοντας, θα μπορούσε κανείς να πει ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό της αρχικής παραμόρφωσης τόσο πιο ψαθυρή γίνεται η συμπεριφορά του υλικού, αφού αυξάνεται το όριο διαρροής τους ενώ ταυτόχρονα μειώνεται η περιοχή της πλαστικής παραμόρφωσης τους. Πιο έντονη είναι η διαφοροποίηση των καμπύλων με χαμηλό ή μηδενικό ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης, όπου υπάρχουν μεγάλα περιθώρια μαρτενσιτικού μετασχηματισμού κατά την διαδικασία του μονοαξονικού εφελκυσμού ενώ αντίθετα όσο μεγαλώνει το ποσοστό προέντασης τόσο οι καμπύλες τείνουν να ταυτιστούν.

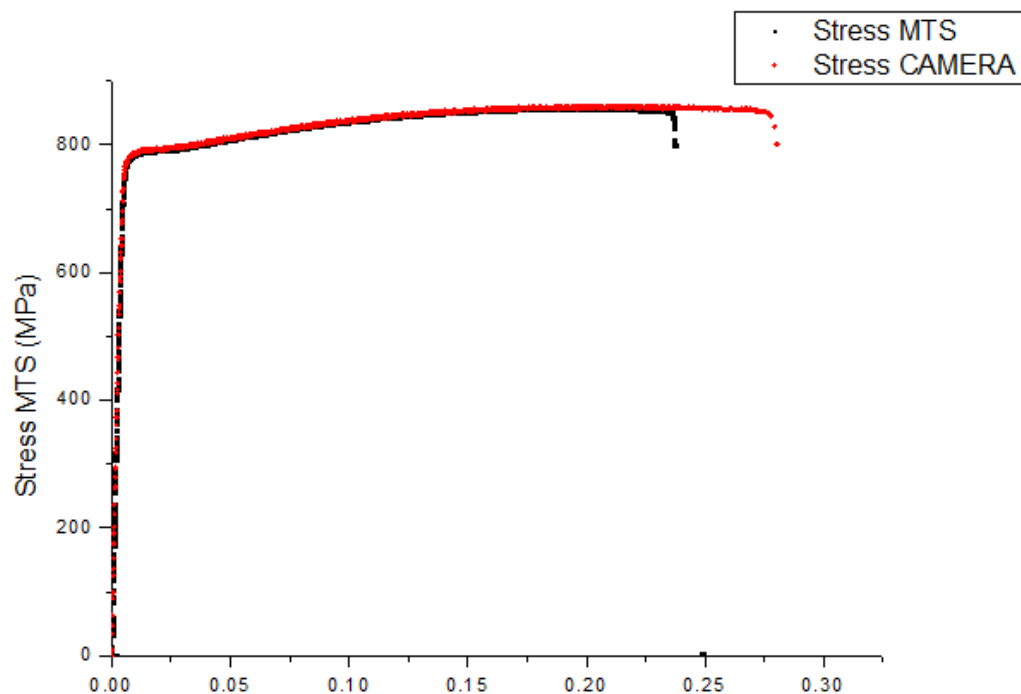
### 5.1.2. Σύγκριση καμπυλών εφελκυσμού από δύο διαφορετικά συστήματα καταγραφής

Κατά τη διάρκεια των τριών από τα έξι πειράματα που έλαβαν χώρα στα πλαίσια της παρούσας εργασίας οι μετρήσεις των παραμορφώσεων έγιναν με την ταυτόχρονη χρήση του ειδικού επιμηκυνσιόμετρου της MTS και του οπτικού συστήματος καταγραφής παραμορφώσεων της Limes. Η χρήση και των δύο συστημάτων έγινε σε μία προσπάθεια να συγκριθούν τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα δύο διαφορετικά συστήματα καταγραφής ώστε να αξιολογηθεί η αξιοπιστία των μετρήσεων των δύο συστημάτων αλλά και να κριθεί αν είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τα δύο αυτά συστήματα σε μελλοντικές μελέτες.

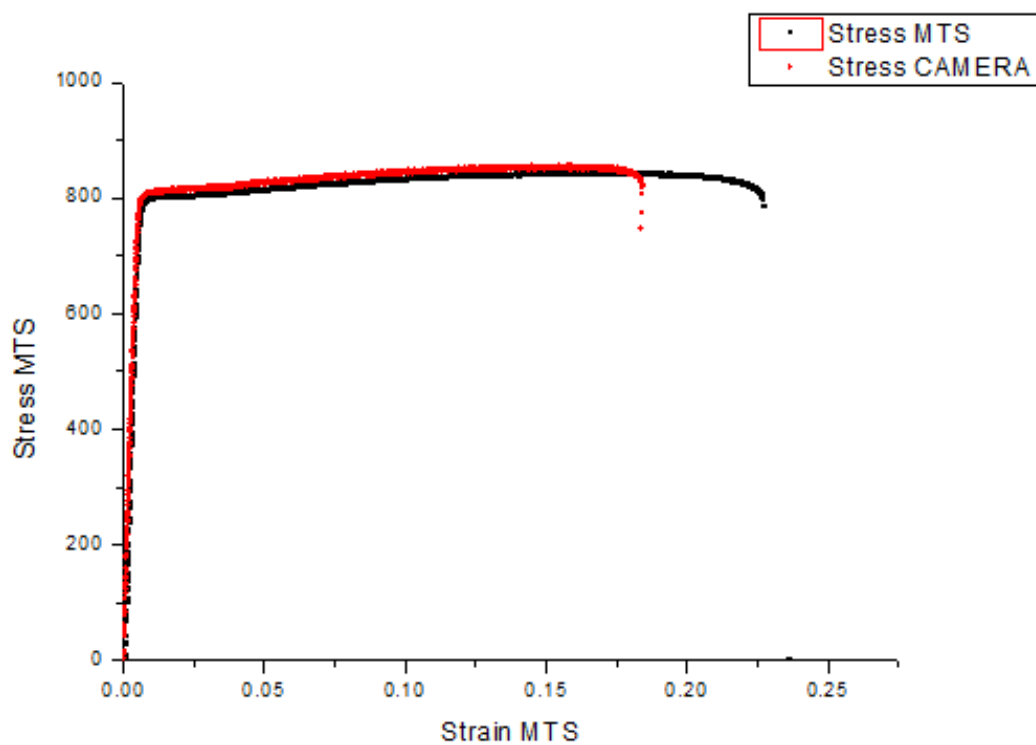
Τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης που προέκυψαν για κάθε ένα από τα ποσοστά παραμόρφωσης και με τις δύο μεθόδους καταγραφής δεδομένων δίνονται παρακάτω στα σχήματα 5-3, 5-4 και 5-5 όπου σε κάθε από αυτά απεικονίζονται οι καμπύλες που προέκυψαν κατά την εκπόνηση των πειραμάτων για κάθε ένα από τα εύρη αρχικής παραμορφώσεως που μελετήθηκαν.



*Σχήμα 5-3: Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης χάλυβα TRIP 700 για ποσοστό προέντασης 4% με καταγραφή δεδομένων μέσω επιμηκυνσιόμετρου και οπτικού συστήματος*



Σχήμα 5-4: Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης χάλυβα TRIP 700 για ποσοστό προέντασης 8% με καταγραφή δεδομένων μέσω επιμηκυνσιόμετρου και οπτικού συστήματος

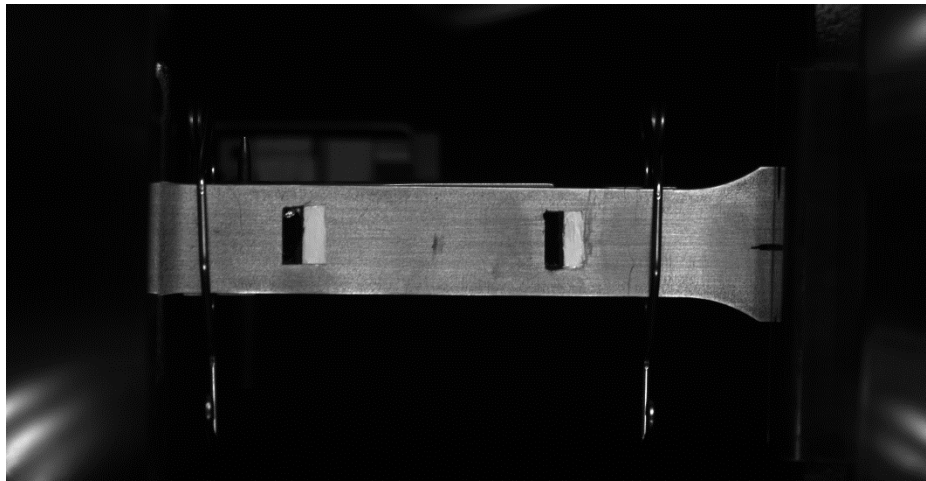


Σχήμα 5-5: Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης χάλυβα TRIP 700 για ποσοστό προέντασης 12% με καταγραφή δεδομένων μέσω επιμηκυνσιόμετρου και οπτικού συστήματος

Και από τα τρία πειράματα για τα οποία πραγματοποιήθηκε καταγραφή των παραμορφώσεων με δύο διαφορετικούς τρόπους καταγραφής οι καμπύλες που προέκυψαν ακολουθούν το ίδιο μοτίβο και προκύπτουν αντίστοιχα συμπεράσματα.

Συγκεκριμένα, και στις τρεις περιπτώσεις οι καμπύλες σχεδόν ταυτίζονται με την καμπύλη που προέκυψε από το οπτικό σύστημα η ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των καμπυλών είναι αμελητέα.

Τυχόν μικροαποκλίσεις στις καμπύλες οφείλονται στην τοποθέτηση των ειδικών αυτοκόλλητων για την χρήση της κάμερας που έγινε σε αρκετά μικρότερη απόσταση από το κέντρο σε σχέση με την τοποθέτηση του επιμηκυνσιόμετρου. Πιο συγκεκριμένα, ενώ το επιμηκυνσιόμετρο της MTS έχει μήκος ίσο με 50mm τα αυτοκόλλητα τοποθετήθηκαν σε μεταξύ τους απόσταση 30mm. Η επιλογή αυτή έγινε παρά την γνώση ότι ήταν προτιμότερο τα δύο μετρητικά να μετρούν με σημεία αναφοράς όσο πιο κοντά το ένα στο άλλο ήταν δυνατό, γιατί η κάμερα δεν ήταν δυνατό να καταγράψει την απόσταση μεταξύ των δύο αυτοκόλλητων σε κοντινότερη απόσταση με το επιμηκυνσιόμετρο λόγω της αντανάκλασης των μεταλλικών υποδοχών του επιμηκυνσιόμετρου, όπως φαίνεται στην εικόνα 5-1.

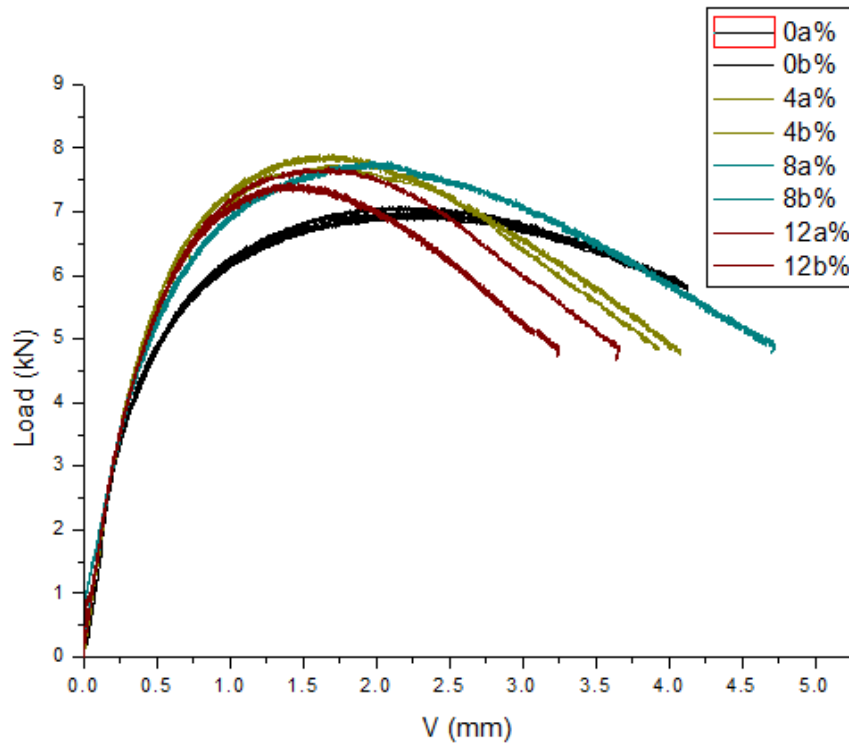


*Εικόνα 5-1: Δοκίμιο εφελκυσμού που έχει προετοιμαστεί για δύο διαφορετικούς τρόπους καταγραφής*

Συμπερασματικά, και τα δύο συστήματα μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα για την καταγραφή των παραμορφώσεων ενός δοκιμίου υπό την επίδραση εφελκυστικών φορτίων οδηγώντας σε συγκρίσιμα μεταξύ τους αποτελέσματα ενώ οι αποκλίσεις που παρουσιάζονται στην παραμόρφωση θραύσης του υλικού μπορούν να εξαλειφθούν με τοποθέτηση των μετρητικών σε σωστή απόσταση από το κέντρο του δοκιμίου, γεγονός το οποίο είναι εφικτό μόνο αν η καταγραφή γίνει από οποιαδήποτε από τα δύο συστήματα μεμονωμένα καθώς η ταυτόχρονη χρήση τους εισάγει περιορισμούς σχετικά με την τοποθέτηση των αυτοκόλλητων του οπτικού συστήματος καταγραφής της Limes.

## 5.2 Αποτελέσματα πειραμάτων αντίστασης σε θραύση

Οι καμπύλες αντίστασης σε θραύση (καμπύλες R) σε μορφή διαγραμμάτων εφαρμοζόμενης δύναμης-ανοίγματος χειλέων (Load-V) παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στο σχήμα 5-6 και οι χαρακτηριστικές τιμές των διαγραμμάτων στον πίνακα 5-2.



Σχήμα 5-6: Καμπύλη δυσθραυστότητας χάλυβα TRIP 700 για διάφορα ποσοστά προέντασης

Αριθμός δοκιμίου	Ποσοστό προέντασης	$P_{max}(kN)$	V (για $P_{max}$ ) (mm)	Μέση τιμή $P_{max}$	Μέση τιμή V
A	0%	7.077	2.12	7.029	2.155
B		6.981	2.19		
Γ	4%	7.876	1.65	7.803	1.69
Δ		7.730	1.73		
E	8%	7.713	1.97	7.744	1.99
Z		7.774	2.01		
H	12%	7.423	1.41	7.546	1.54
Θ		7.669	1.67		

Πίνακας 5-2 : Χαρακτηριστικές τιμές που πειραμάτων αντίστασης σε θραύση του χάλυβα TRIP 700 για διαφορετικά ποσοστά προέντασης

Παρατηρώντας τις καμπύλες παρατηρούνται διαφορές στη συμπεριφορά θραύσης ανάλογα με το ποσοστό της αρχικής παραμόρφωσης. Η υψηλότερη αντίσταση του υλικού σε άνοιγμα των χειλέων του υλικού (μέγιστη δύναμη στην καμπύλη αντίστασης  $R$ ) παρατηρήθηκε για τα δοκίμια με ποσοστό προέντασης 4% ενώ τη χαμηλότερη αντίσταση σε εξέλιξη ρωγμής έδειξαν τα δοκίμια χωρίς αρχικό ποσοστό προέντασης, δηλαδή το υλικό αναφοράς.

Πιο συγκεκριμένα, για αρχική παραμόρφωση 4% το μέγιστο φορτίο είχε τιμή  $P_{\max}=7.876\text{kN}$  και επιτεύχθηκε για το δοκίμιο Γ ενώ το μικρότερο φορτίο αντιστοιχεί σε αρχικό ποσοστό παραμόρφωσης 0%, επιτεύχθηκε για το δοκίμιο Β και ήταν ίσο με  $P_{\max}=6.981\text{kN}$ .

Ακόμα, από το διάγραμμα αλλά και από τα στοιχεία του πίνακα παρατηρείται ότι η τιμή του μέγιστου ανοίγματος των χειλέων της ρωγμής και κατ' επέκταση το μήκος ρωγμής το μέγιστο φορτίο. Η μέγιστη τιμή ανοίγματος χειλέων παρατηρήθηκε για αρχικό ποσοστό παραμόρφωσης 0% και ήταν 2.19mm ενώ η μικρότερη τιμή ανοίγματος χειλέων παρατηρήθηκε για αρχικό ποσοστό παραμόρφωσης 12% και ήταν 1.41mm.

Καθώς η γεωμετρία όλων των δοκιμών ήταν ίδια, η διαφορετική συμπεριφορά θραύσης των υλικών θα πρέπει να εξηγηθεί με βάση τη διαφορετικής μικροδομή των υλικών και την επίδραση της πλαστικής ζώνης που δημιουργείται γύρω από την αιχμή της ρωγμής σε κάθε περίπτωση.

Ένας από τους παράγοντες που επηρεάζουν την αντίσταση του υλικού σε διάδοση ρωγμής είναι ο **μαρτενσιτικός μετασχηματισμός** που λαμβάνει χώρα κατά την επιβολή των εφελκυστικών φορτίων. Για να ενεργοποιηθεί ο μηχανισμός διάδοσης ρωγμής σύμφωνα με την εργασία [20] θα πρέπει να έχει προηγηθεί μετασχηματισμός σε μαρτενσίτη στην περιοχή γύρω από τη ρωγμή καθώς η ρηγμάτωση εξελίσσεται μεταξύ διεπιφανειών μαρτενσίτη που είναι η σκληρή φάση της δομής και φερρίτη που είναι η μαλακή φάση. Αυτό σημαίνει ότι όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό του παραμένουτος ωστενίτη τόσο περισσότερη παραμόρφωση απαιτείται για το μετασχηματισμό του σε μαρτενσίτη και επομένως τόσο αυξάνεται η αντίσταση του υλικού. Με άλλα λόγια, όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό προέντασης τόσο ευκολότερα το υλικό μετασχηματίζει την ωστενιτική φάση σε μαρτενσιτική έτσι τα υλικά με μικρότερα ποσοστά προέντασης παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντίσταση σε θραύση. Αυτό παρατηρείται στα αποτελέσματα του Σχήματος 5-6 όπου δοκίμια με αρχικό ποσοστό προέντασης 4% έδειξαν υψηλότερη αντίσταση σε θραύση, ενώ δοκίμια με προένταση 12% είχαν την μικρότερη αντίσταση σε θραύση.



Από τα αποτελέσματα της εργασίας [24] που δίνονται στον πίνακα 3-2 προκύπτει ότι στα δοκίμια με μικρό ποσοστό προέντασης 4% το ποσοστό μαρτενσιτικού μετασχηματισμού είναι κατά μέσο όρο 19% ενώ στα δοκίμια με μεγάλο αρχικό ποσοστό προέντασης 12% το ποσοστό μετασχηματισμού ανέρχεται σε 43% κατά μέσο όρο. Αυτή η σημαντική ποσοστιαία αύξηση μετασχηματισμού διευκολύνει την έναρξη ρηγμάτωσης καθώς υπάρχουν σε μεγαλύτερο ποσοστό όγκου κόκκοι μαρτενσίτη ώστε να δημιουργηθούν διεπιφανειακές ατέλειες με την μαλακή φάση φερρίτη.

Εξαίρεση αποτελεί το υλικό αναφοράς με 0% αρχική προένταση όπου η αντίσταση σε εξέλιξη ρήγματος είναι μικρότερη από όλα τα υλικά που εξετάστηκαν, παρά το υψηλότερο ποσοστό παραμένοντα ωστενίτη στην μικροδομή (15.8%). Στην περίπτωση αυτή πιθανή εξήγηση είναι ότι οι μεγάλοι κόκκοι ωστενίτη που υπάρχουν στο υλικό αναφοράς υποβαθμίζουν την αντίστασή του σε θραύση, ενώ αντίθετα κατά τον μετασχηματισμό που προκύπτει λόγω προέντασης, η δημιουργία πιο λεπτόκοκκης δομής λόγω του μετασχηματισμού αρχικά των πιο μεγάλων ασταθών κόκκων παραμένοντα ωστενίτη, ενισχύει την αντίσταση του υλικού έναντι εξέλιξης της ρηγμάτωσης. [23, 24, 25]

Το **μέγεθος της πλαστικής ζώνης** που δημιουργείται στην περιοχή γύρω από την αιχμή μπορεί να αποτελεί ένα από τους παράγοντες που επηρεάζουν την συμπεριφορά θραύσης του εκάστοτε υλικού. Καθώς η γεωμετρία όλων των δοκιμών είναι ίδια, η διαφοροποίηση στο μέγεθος της πλαστικής ζώνης μεταξύ των δοκιμών εξαρτάται μόνο από το όριο διαρροής που παρουσιάζει κάθε υλικό, αφού ορίζεται από τον τύπο:

$$r_{\pi\lambda} = \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\frac{K}{\sigma_y}\right)^2 \quad (5.1)$$

Είναι άρα εμφανές ότι το μήκος της πλαστικής ζώνης σε κάθε περίπτωση θα είναι αντιστρόφως ανάλογο από το τετράγωνο του ορίου διαρροής του υλικού.

Ως αποτέλεσμα των εφελκυστικών φορτίων ένα μέρος του παραμένοντος ωστενίτη στην περιοχή του άκρου της ρωγμής μετατρέπεται σε μαρτενσίτη, και η μετατροπή αυτή σχεδόν αποκλειστικά στην **μονοτονική πλαστική περιοχή**. Από την μία πλευρά ο περαιτέρω μετασχηματισμός σε μαρτενσίτη με βάση την προηγούμενη εξήγηση θα πρέπει να ευνοεί την εξέλιξη της ρωγμής, από την άλλη μεριά η πλαστική ζώνη δημιουργεί άμβλυνση του άκρου της ρωγμής (crack tip blunting) που καθυστερεί την εξέλιξή της.

Επιπλέον, στη συμπεριφορά δυσθραυστότητας κάποιο ρόλο μπορεί να διαδραματίζει εκτός από την ποσότητα και η σταθερότητα της ωστενιτικής φάσης.

## Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και προτάσεις

### 6.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε πειραματικά η επιρροή της αρχικής παραμόρφωσης σε δοκίμια χάλυβα TRIP 700 τόσο στις ιδιότητες εφελκυσμού του υλικού όσο και στη συμπεριφορά αντίστασης σε θραύση. Τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν από την πειραματική μελέτη μπορούν να συνοψιστούν στα παρακάτω:

- Με την αύξηση του ποσοστού αρχικής παραμόρφωσης αυξάνει το όριο διαρροής  $\sigma_y$  και μειώνεται η παραμόρφωσης θραύσης του υλικού. Το όριο θραύσης  $\sigma_{uts}$  αρχικά αυξάνεται ενώ για ποσοστά μεγαλύτερα του 8% μειώνεται. Οι μεταβολές αυτές οφείλονται τόσο στην πλαστική παραμόρφωση (εργοσκλήρυνση) που δημιουργείται στο υλικό όσο και στη δημιουργία της σκληρής μαρτενσιτικής φάσης λόγω μετασχηματισμού που λαμβάνει χώρα κατά την διαδικασία προέντασης.
- Αντίθετα ο συντελεστής εργοσκλήρυνσης μειώνεται με την αύξηση της αρχικής πλαστικής παραμόρφωσης, η οποία περιορίζει την ικανότητα του υλικού για περαιτέρω μαρτενσιτικό μετασχηματισμό.
- Η παρουσία προέντασης αυξάνει την αντίσταση σε θραύση σε σχέση με το υλικό χωρίς αρχική προένταση. Ωστόσο στα υλικά με προένταση η αντίσταση σε θραύση του υλικού υποβαθμίζεται με την αύξηση του ποσοστού προέντασης στο υλικό. Η αύξηση του ποσοστού αρχικής προέντασης οδηγεί σε μείωση του φορτίου θραύσης που χαρακτηρίζει την αντίσταση του υλικού στην αρχική εξέλιξη ρωγμής.
- Τον κυριότερο ρόλο στην συμπεριφορά θραύσης διαδραματίζουν το ποσοστό μαρτενσίτη και το μέγεθος του κόκκου του παραμένοντα ωστενίτη. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι το μέγεθος κόκκου του ωστενίτη επηρεάζει αντιστρόφως ανάλογα την αντίσταση σε θραύση. Κατά δεύτερο λόγο επηρεάζουν την αντοχή σε θραύση η σταθερότητα του παραμένοντος ωστενίτη και το μέγεθος της πλαστικής ζώνης που δημιουργείται στην περιοχή γύρω από τη ρωγμή.

## 6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Κατά την διεκπεραίωση της πειραματικής και θεωρητικής μελέτης του χάλυβα TRIP 700 προέκυψαν διάφορα ερωτήματα τα οποία παρ' όλο που δεν ήταν δυνατό να μελετηθούν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, θα μπορέσουν να αποτελέσουν εργαλείο για την ουσιαστική κατανόηση του φαινομένου TRIP και της συσχέτισής του με την επιβολή αρχικής προέντασης στο υλικό. Με βάση αυτά, προτείνονται τα εξής για μελλοντική έρευνα:

- i. Η μελέτη της επίδρασης της αρχικής προέντασης σε συμπεριφορά θραύσης σε δοκίμια μεγαλύτερων διαστάσεων και για διάφορα πάχη δοκιμίου προκειμένου να μπορεί να γίνει υπολογισμός της δυσθραυστότητας  $K_C$  στα πλαίσια της γραμμικής ελαστικής θεωρίας.
- ii. Η πειραματική διερεύνηση της επίδρασης της προέντασης στο χάλυβα TRIP στη συμπεριφορά κόπωσης του υλικού καθώς και στη συμπεριφορά διάδοσης ρωγμής κατά την κυκλική καταπόνησή του.
- iii. Έλεγχος της συμπεριφοράς θραύσης με τη χρήση κώδικα πεπερασμένων στοιχείων για την αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας κατασκευαστικών στοιχείων με πολλαπλές ρωγμές.

## Κεφάλαιο 7: Βιβλιογραφία

1. Griffith, A.A. and M. Eng, VI. *The phenomena of rupture and flow in solids*. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, 1921. **221**(582-593): p. 163-198.
2. Γ. Παντελάκης, Σ. and Κ.Ι. Τσερπές, *ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΙΕΡΙΦΟΡΑ ΥΛΙΚΩΝ*. Εκδόσεις Τζιόλα, 2015.
3. Dowling, N.E., *Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue*. 2012: Pearson.
4. Anderson, T.L., *Fracture mechanics: fundamentals and applications*. 2017: CRC press.
5. Standard, A., *E561-98*. Standard practice for R-curve determination. Annual book of ASTM Standards, 1998. **3**.
6. Jacques, P.J., *Transformation-induced plasticity for high strength formable steels*. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2004. **8**(3): p. 259-265.
7. Χαϊδεμενόπουλος, Γ.Ν., *Φυσική μεταλλουργία*. Εκδόσεις Τζιόλα, 2007.
8. Bhadeshia, H.K.D.H., *Bainite in Steels: Transformations, Microstructure and Properties*. IOM Communications Ltd, 2001. 63-89.
9. Oliver, S., T.B. Jones, and G. Fourlaris, *Dual phase versus TRIP strip steels: Microstructural changes as a consequence of quasi-static and dynamic tensile testing*. Materials Characterization, 2007. **58**(4): p. 390-400.
10. Auto/Steel Partnership, *Advanced High-Strength Steels Product and Process, Application Guidelines*, Southfield Michigan, April 2008
11. Bhadeshia, H., *Worked examples in the Geometry of Crystals, the Institute of Materials*. The Institute of Metals, 2001, London.
12. TAKAHASHI, M., *High-strength steel sheets offering high impact energy-absorbing capacity*. Nippon Steel Technical Report, 2000. **81**(0).
13. Olson, G. and M. Cohen, *A mechanism for the strain-induced nucleation of martensitic transformations*. Journal of the Less Common Metals, 1972. **28**(1): p. 107-118.
14. Lacroix, G., T. Pardoen, and P.J. Jacques, *The fracture toughness of TRIP-assisted multiphase steels*. Acta Materialia, 2008. **56**(15): p. 3900-3913.
15. Cheng, X., et al., *Fatigue crack growth in TRIP steel under positive R-ratios*. Engineering Fracture Mechanics, 2008. **75**(3): p. 739-749.
16. Kobayashi, J., et al., *Fracture toughness of an advanced ultrahigh-strength TRIP-aided steel*. ISIJ international, 2014. **54**(4): p. 955-962.
17. Tang, Z.-y., et al., *Effect of Prestrain on Microstructures and Properties of Si-Al-Mn TRIP Steel Sheet With Niobium*. Journal of Iron and Steel Research, International, 2010. **17**(4): p. 59-65.

18. Μπέλλας, Η.Ι., *Study of strain-induced transformation in low-alloy trip steels*. M. Sc. Thesis, University of Thessaly, 2015.
19. Κατσαρός, Θ., *Μεταλλογραφική ανάλυση πολυφασικών χαλύβων διπλής φάσης (DP) και πλαστικότητας μετασχηματισμού (TRIP)*. Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2003.
20. Highway, A.A.o.S., et al., *E8M-04 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials (Metric) 1*. 2004: ASTM international.
21. Ndzinga, E. and A. Desire, *Ηλεκτροδιάβρωση (Electrical Discharge Machine, Edm) και νεώτερες εφαρμογές της*. Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2008.
22. Standard, A., *E647-00*. Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates, 2000. **100**.
23. Schwalbe, K.-H. (1977). "*On the influence of microstructure on crack propagation mechanisms and fracture toughness of metallic materials.*" Engineering Fracture Mechanics **9**(4): 795-832.
24. Kang, J., Changning Li, Guo Yuan, Guo-dong Wang. (2016). "*Improvement of strength and toughness for hot rolled low-carbon bainitic steel via grain refinement and crystallographic texture.*" Materials Letters 175: 157-160.
25. Kumar, A. S., et al. (2010). "*Effect of microstructure and grain size on the fracture toughness of a micro-alloyed steel.*" Materials Science and Engineering: A 527(4-5): 954-960.